

Evolution of the Antarctic surface mass balance by high-resolution downscaling and impact on sea-level change for the next centuries

Cécile AGOSTA, Vincent FAVIER, Christophe GENTHON,
Hubert GALLÉE and Gerhard KRINNER

Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement
CNRS/UJF – Grenoble, France



Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement



UNIVERSITÉ DE GRENOBLE



1.1 Mass balance uncertainties

Grounded ice sheet :

$$\text{Surface mass balance} + \text{Ice flux} \\ = \text{Mass balance} = \text{Sea level contribution}$$

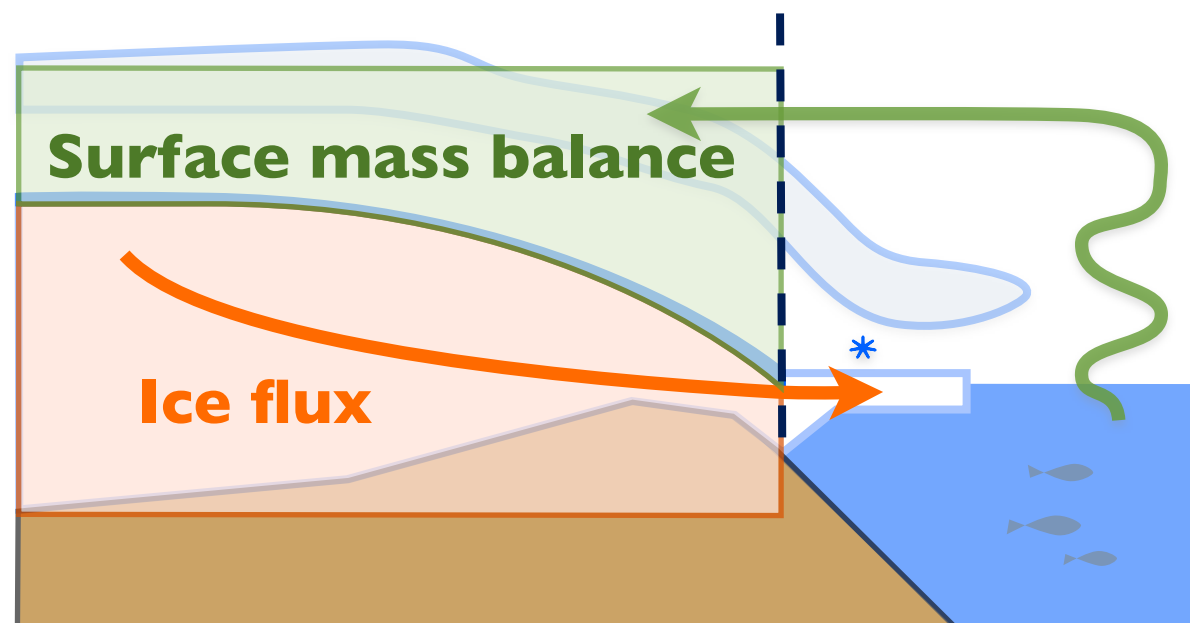
Estimations for the end of the 20th century :

$$= (-5,5 \pm 0,3) + (6,0 \pm 0,1) \text{ mm/yr}$$

Lenaerts et al. 2012 Rignot et al. 2011

$$= (0,5 \pm 0,4) \text{ mm/yr}$$

Observed sea level rise : ~3 mm/yr



1.1 Mass balance uncertainties

Grounded ice sheet :

$$\text{Surface mass balance} + \text{Ice flux} \\ = \text{Mass balance} = \text{Sea level contribution}$$

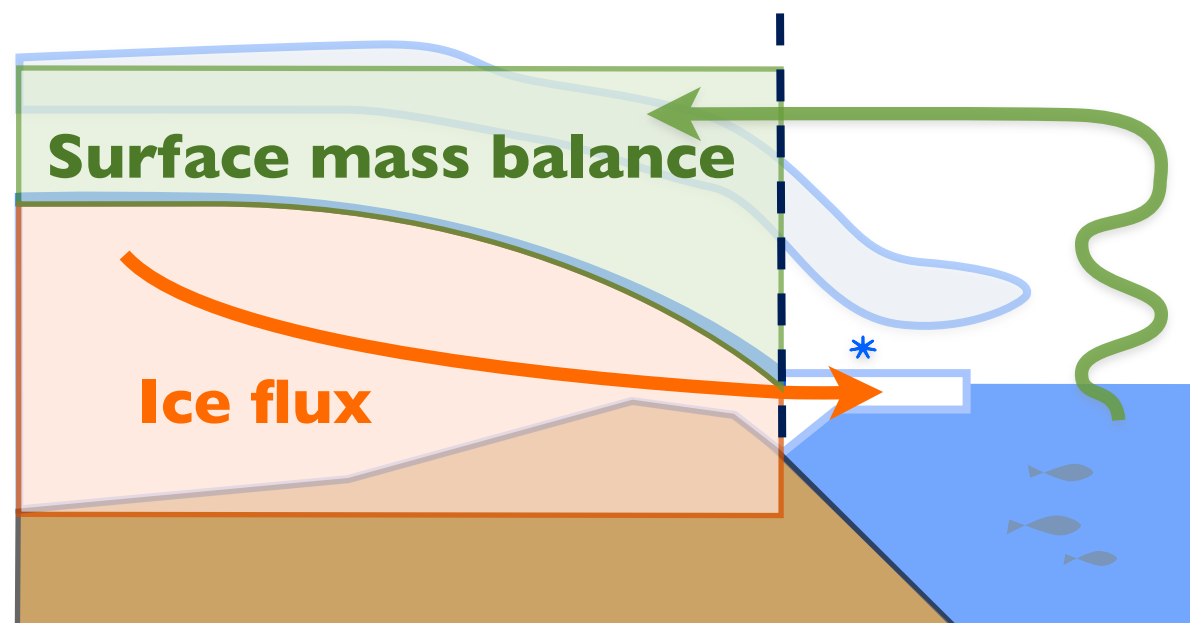
Estimations for the end of the 20th century :

$$= (-5,5 \pm 0,3) + (6,0 \pm 0,1) \text{ mm/yr}$$

Lenaerts et al. 2012 Rignot et al. 2011

$$= (0,5 \pm 0,4) \text{ mm/yr}$$

Observed sea level rise : $\sim 3 \text{ mm/yr}$



1.1 Mass balance uncertainties

Evolution for the next centuries ?

Response to global warming :

Surface mass balance : instantaneous

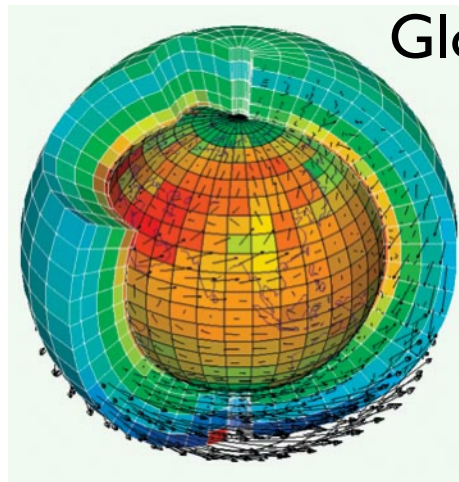
Ice flux : acceleration, indirect effect

(in West Antarctica, Pritchard et al. 2012)



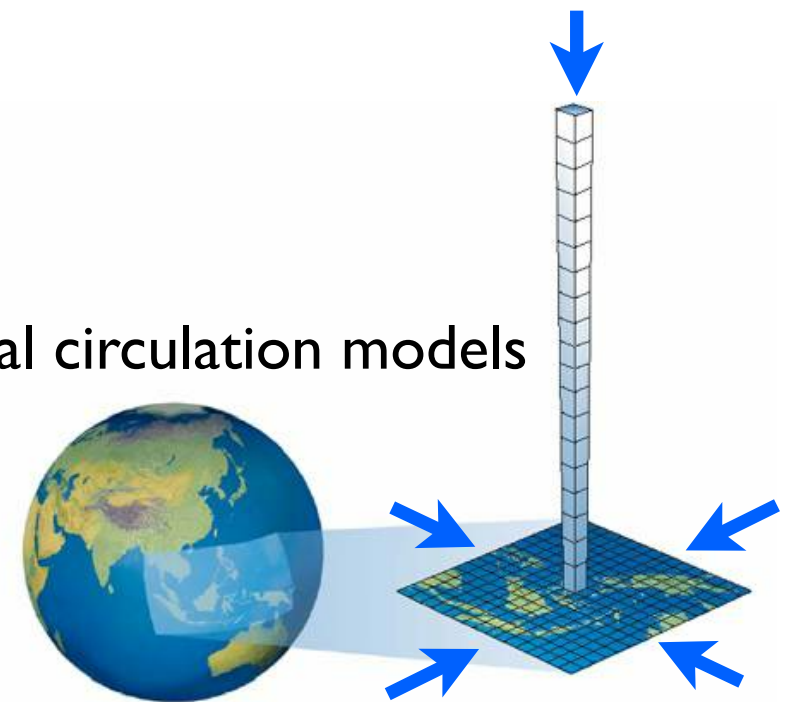
1.2 Aim of the downscaling ?

Modeling : only tool to estimate the SMB evolution



Global circulation models

Regional circulation models



Antarctic SMB estimations
depend on models **resolution**
(IPCC 2007, Genthon et al. 2009)



1.2 Aim of the downscaling ?

Good SMB estimation :
require **high resolution (<20 km)**
at ice-sheet margins
(high accumulation, complex topography)

BUT :

Large spatial extent (5000 km x 5000 km)
Large temporal extent (hundred of years)

→ Climate models **limited by computational costs**

1

Model

2

Valid.

3

Futur

4

Concl.

5



2.1 Downscaling method

Goals

1

2

Valid.

3

Futur

4

Concl.

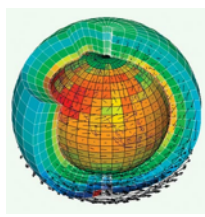
5



INPUTS

(RESOLUTION : ~50 KM)

Large-scale model outputs :
P, T, Q, U, V, W, R



3D Fields
Time step : 6H

Surface fields
Time step : 3H

High-resolution topography



OUTPUTS
(RES. : ~15 KM)

2.1 Downscaling method

Goals

1

2

Valid.

3

Futur

4

Concl.

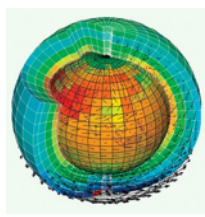
5



INPUTS

(RESOLUTION : ~50 KM)

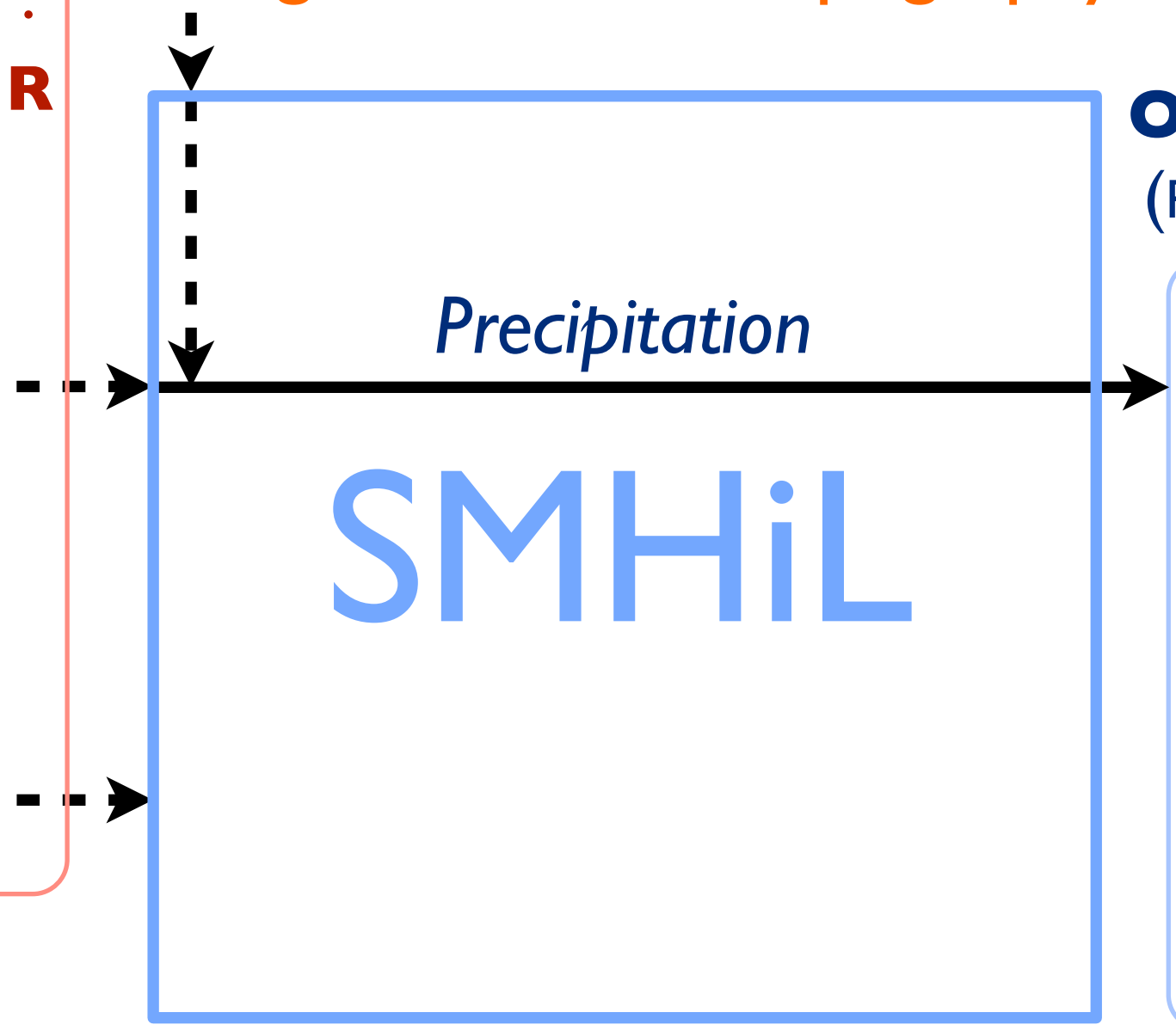
Large-scale model outputs :
P, T, Q, U, V, W, R



3D Fields
Time step : 6H

Surface fields
Time step : 3H

High-resolution topography



SMHiL

OUTPUTS

(RES. : ~15 KM)



2.1 Downscaling method

Goals

1

2

Valid.

3

Futur

4

Concl.

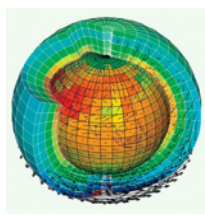
5



INPUTS

(RESOLUTION : ~50 KM)

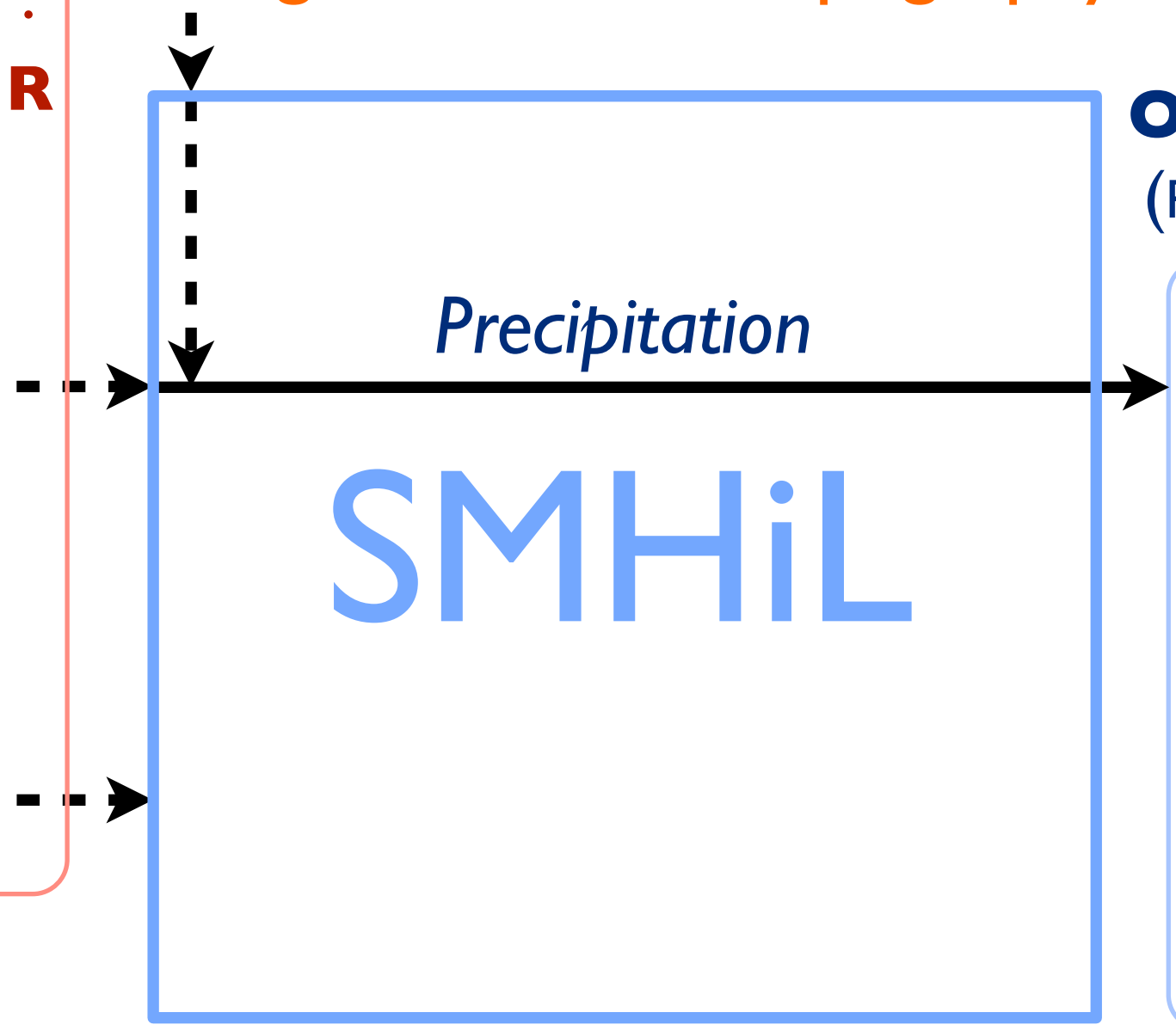
Large-scale model outputs :
P, T, Q, U, V, W, R



3D Fields
Time step : 6H

Surface fields
Time step : 3H

High-resolution topography



OUTPUTS

(RES. : ~15 KM)

Snow
Rain

2.1 Downscaling method

Goals

1

2

Valid.

3

Futur

4

Concl.

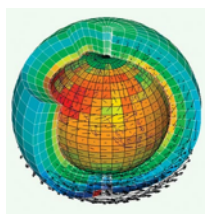
5



INPUTS

(RESOLUTION : ~50 KM)

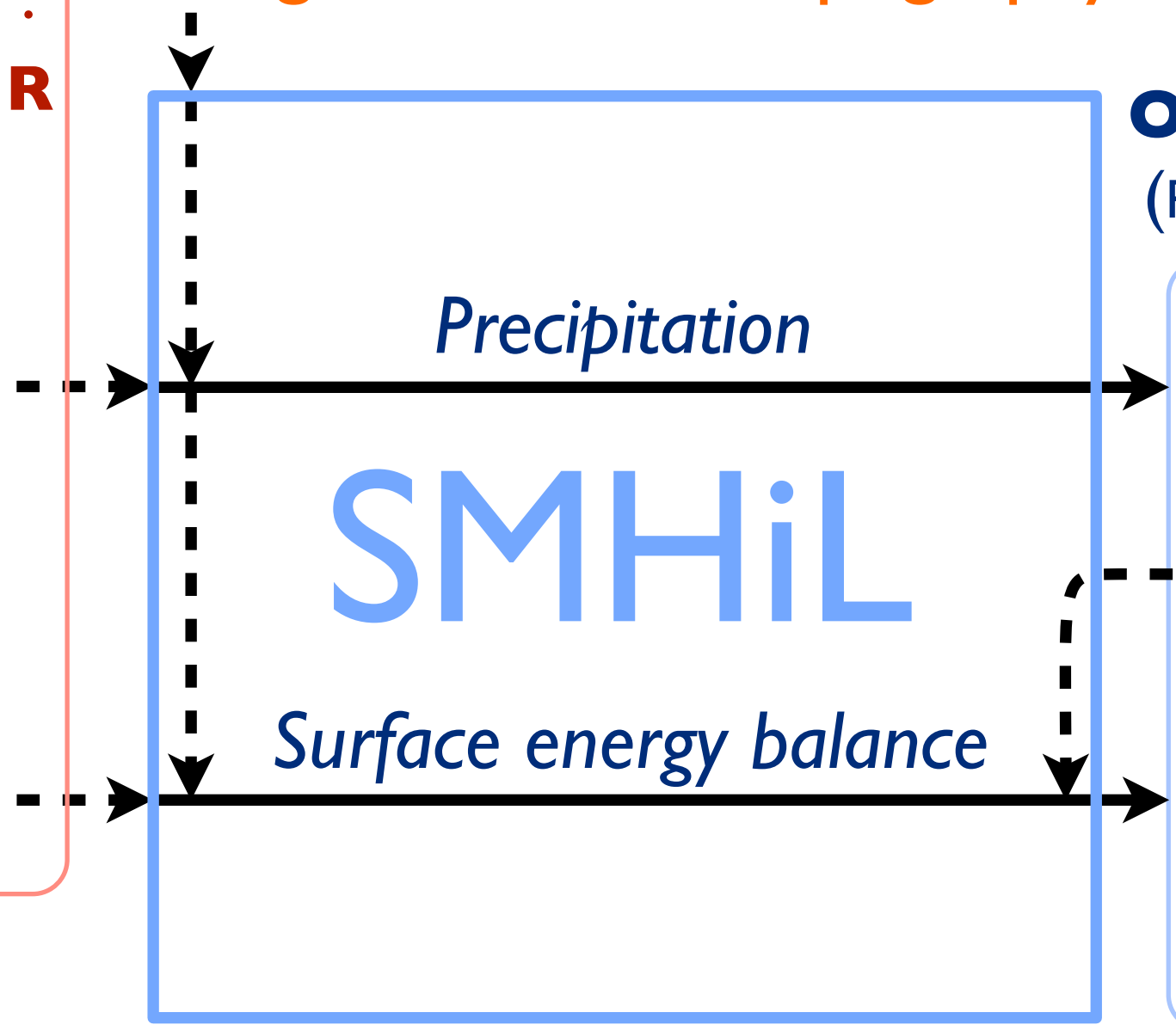
Large-scale model outputs :
P, T, Q, U, V, W, R



3D Fields
Time step : 6H

Surface fields
Time step : 3H

High-resolution topography



OUTPUTS

(RES. : ~15 KM)

Snow
Rain

2.1 Downscaling method

Goals

1

2

Valid.

3

Futur

4

Concl.

5



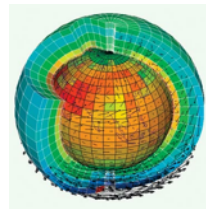
16/07/12

05

INPUTS

(RESOLUTION : ~50 KM)

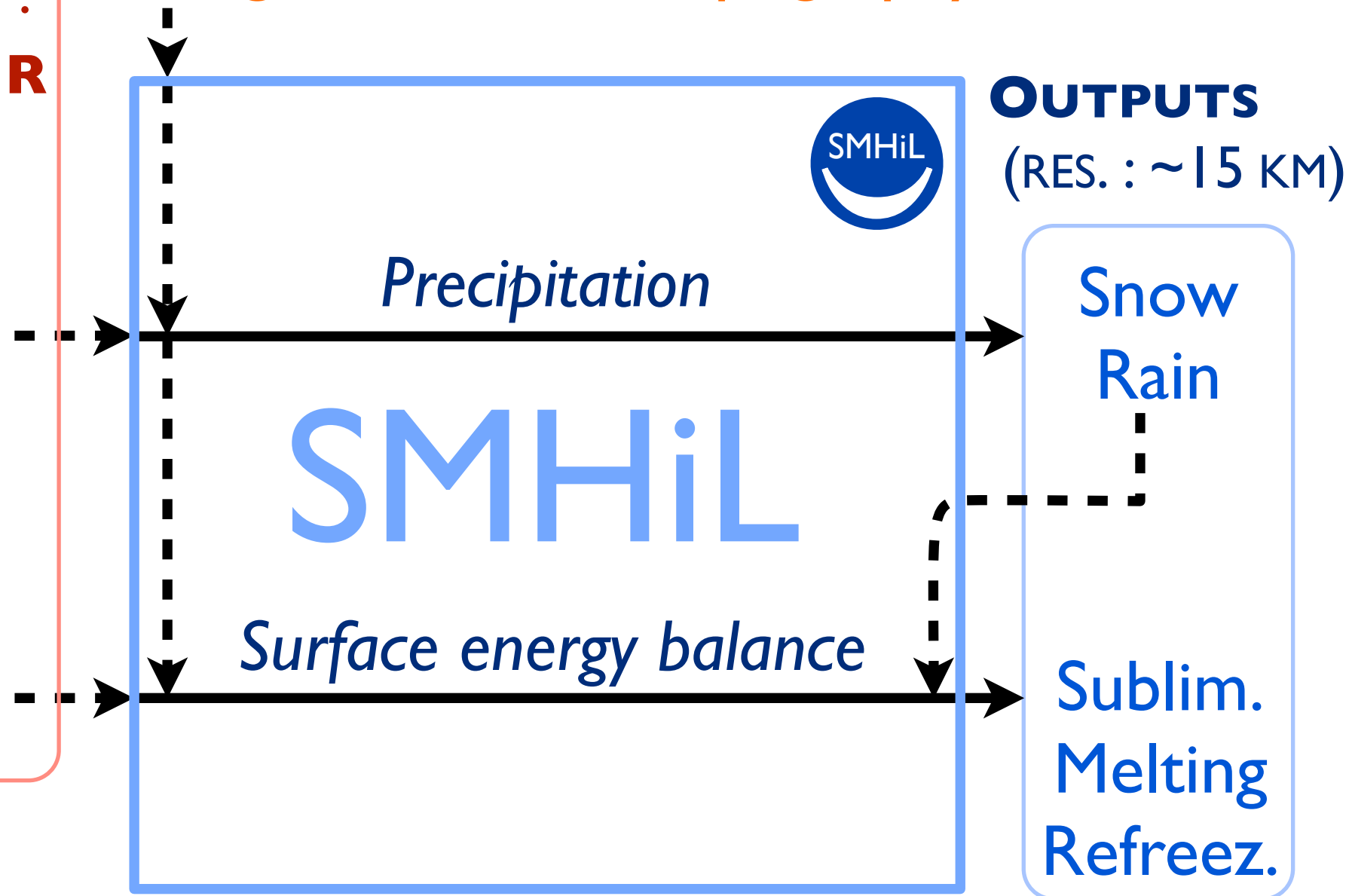
**Large-scale
model outputs :**
P, T, Q, U, V, W, R



3D Fields
Time step : 6H

Surface fields
Time step : 3H

High-resolution topography



OUTPUTS
(RES. : ~15 KM)

Snow
Rain

Sublim.
Melting
Refreez.

2.2 Precipitation downscaling

Goals

1

2

Valid.

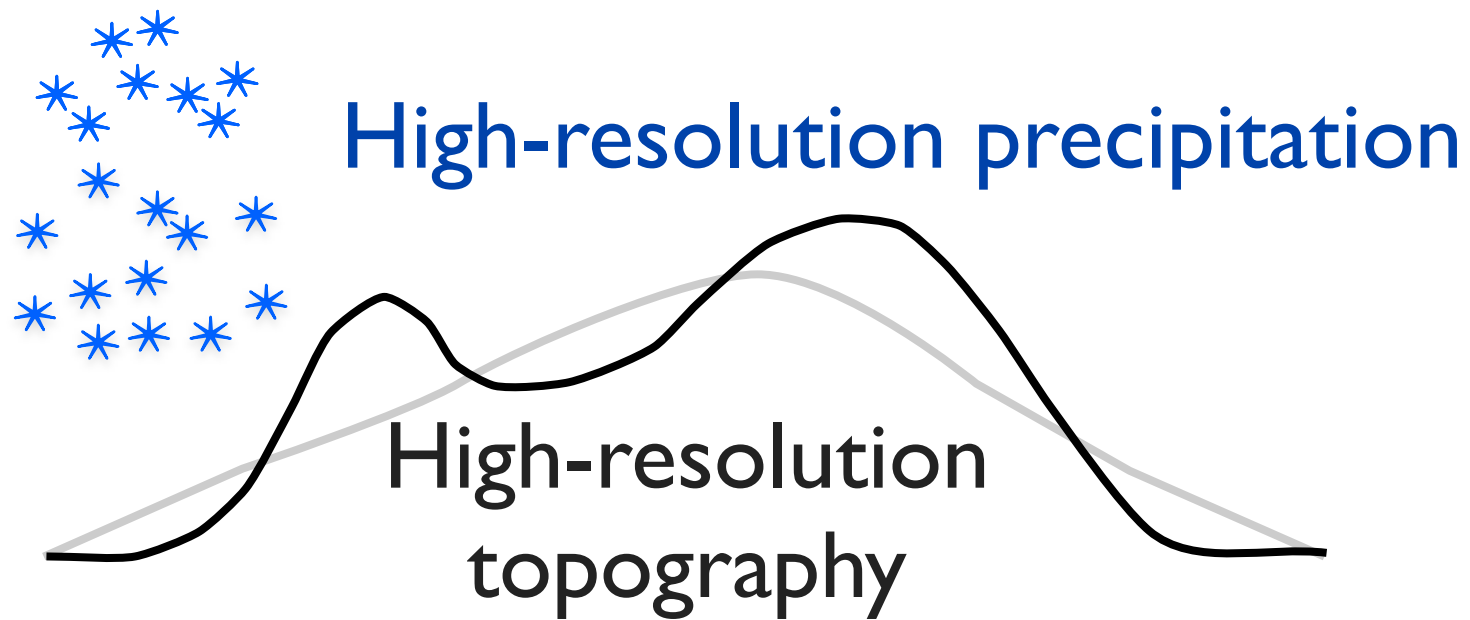
3

Futur

4

Concl.

5



2.2 Precipitation downscaling

Orographic precipitation

Linked to topography

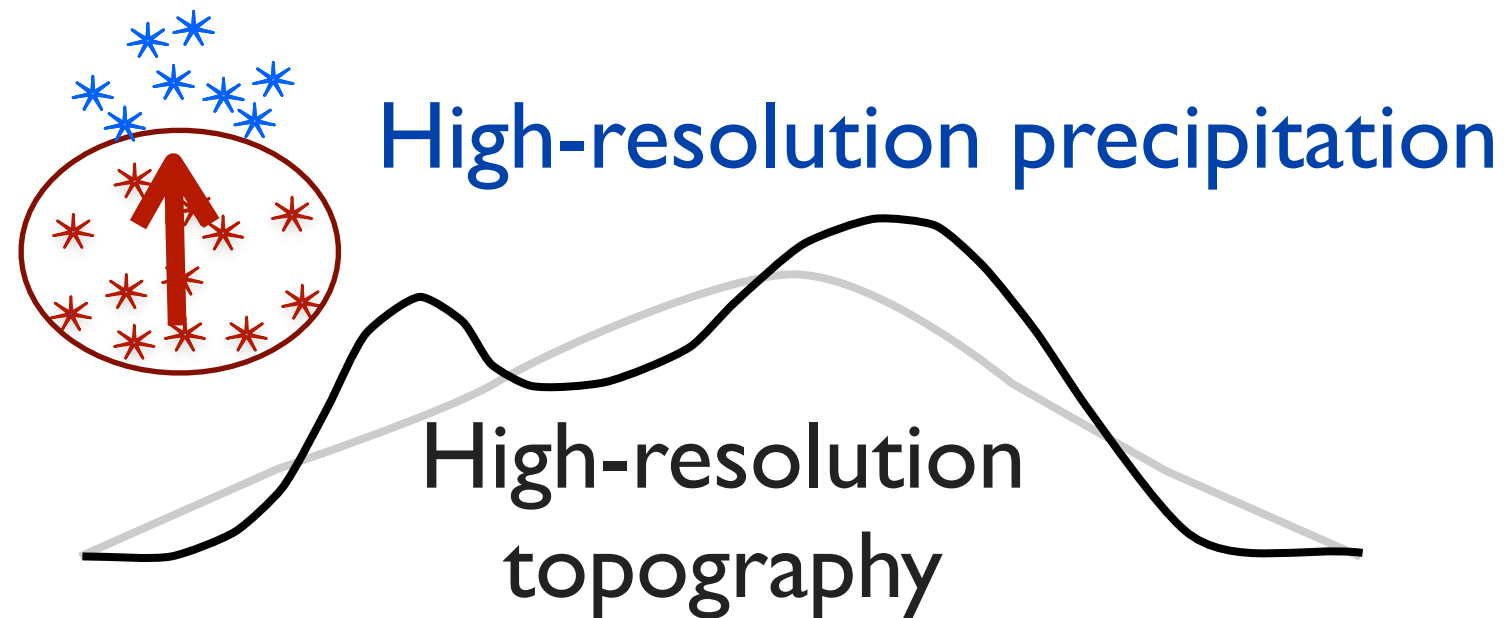
I-D (air column) parametrization

Brasseur, Fettweis, Gallée, Gentil

Sinclair, 1994

Funk et Michaelsen, 2004

Durran and Klemp, 1982



Goals

1

2

Valid.

3

Futur

4

Concl.

5



2.2

Precipitation downscaling

Non-orographic precipitation

Synoptic scale

Computed from large-scale outputs

Orographic precipitation

Linked to topography

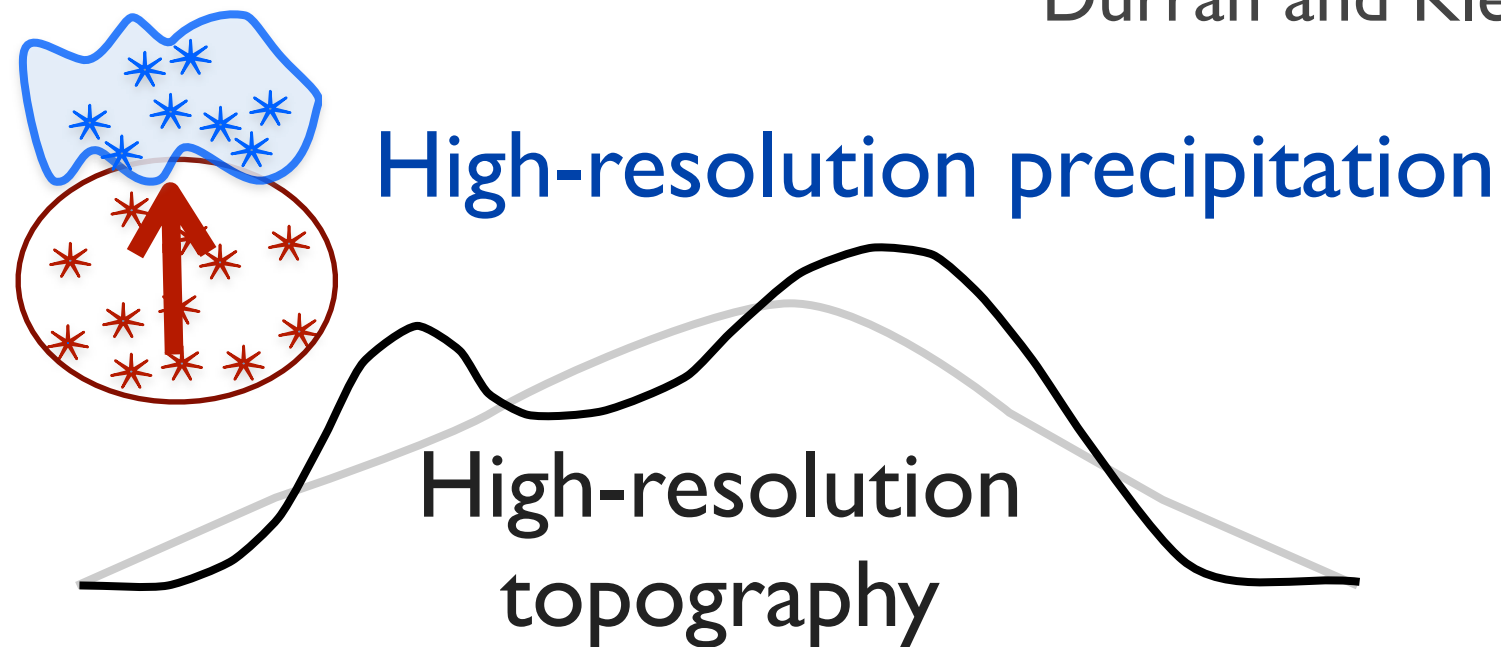
I-D (air column) parametrization

Brasseur, Fettweis, Gallée, Gentil

Sinclair, 1994

Funk et Michaelsen, 2004

Durran and Klemp, 1982



Goals

1

2

Valid.

3

Futur

4

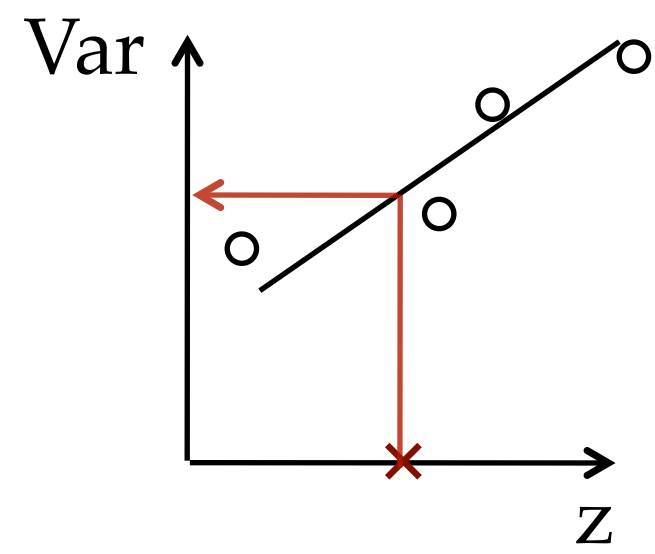
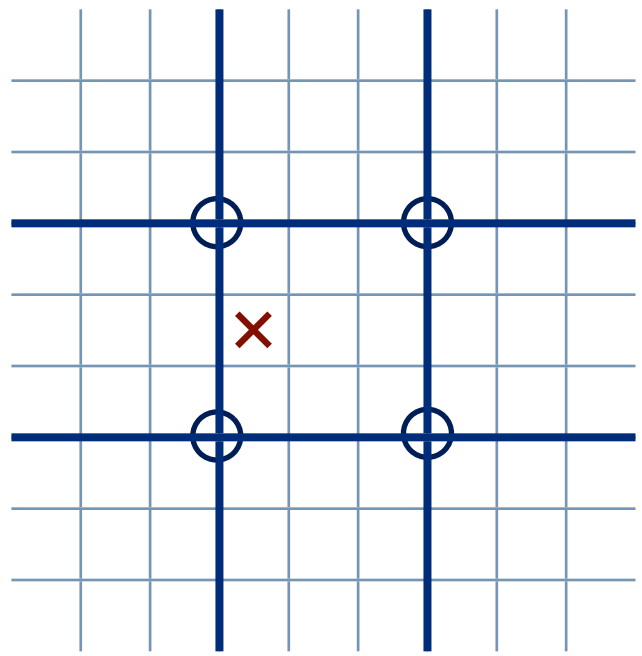
Concl.

5



2.3 Surface energy balance downscaling

Local regression of large-scale surface fields against the topography



Goals

1

2

Valid.

3

Futur

4

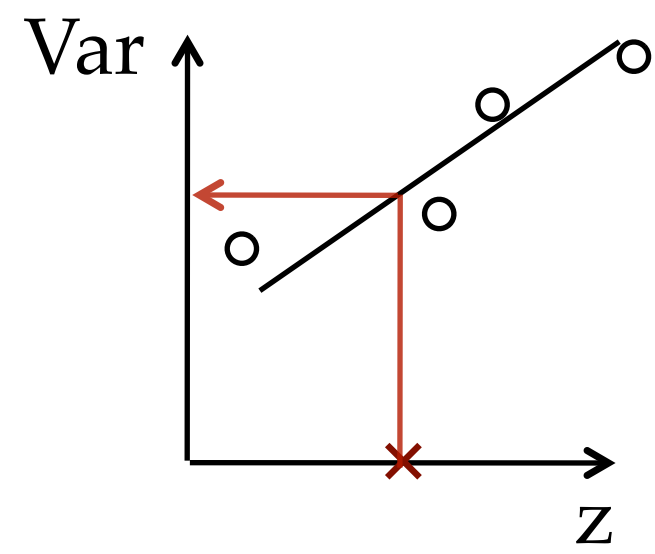
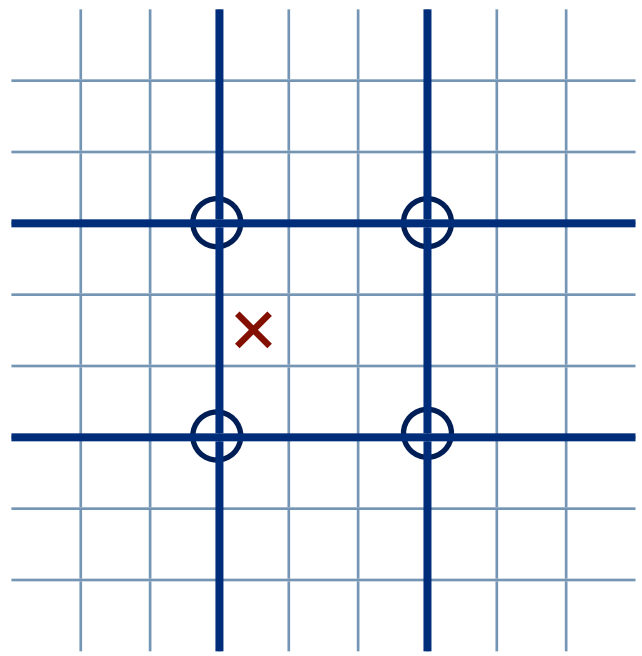
Concl.

5



2.3 Surface energy balance downscaling

Local regression of large-scale surface fields against the topography



Surface scheme

Goals

1

2

Valid.

3

Futur

4

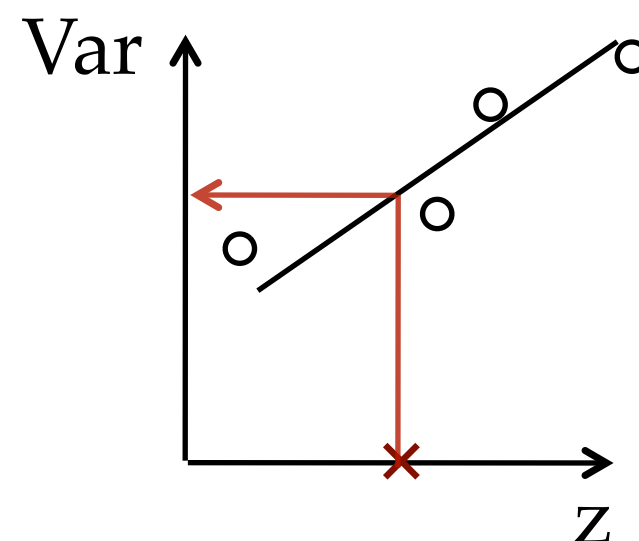
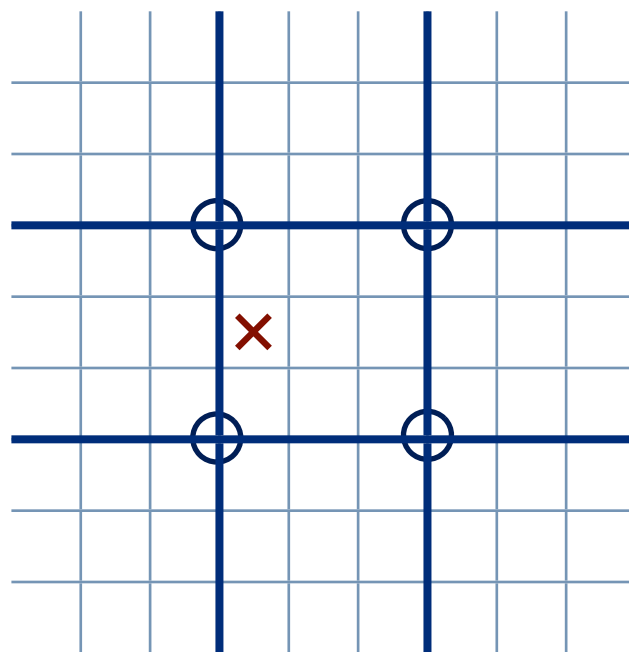
Concl.

5



2.3 Surface energy balance downscaling

Local regression of large-scale surface fields
against the topography



High-resolution
precipitation

Surface scheme

Goals

1

2

Valid.

3

Futur

4

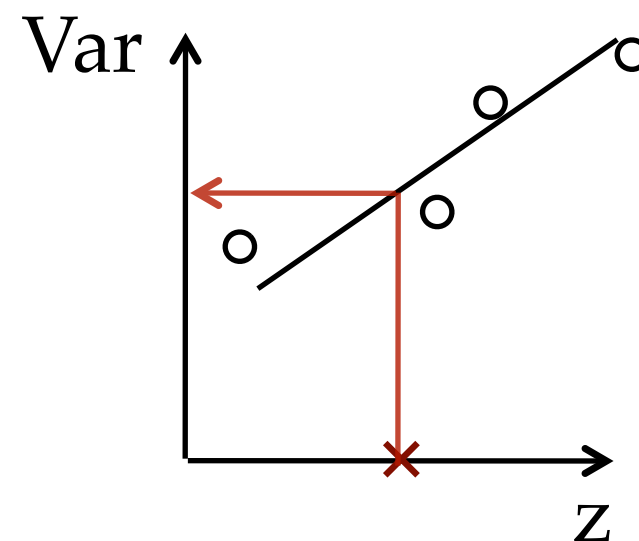
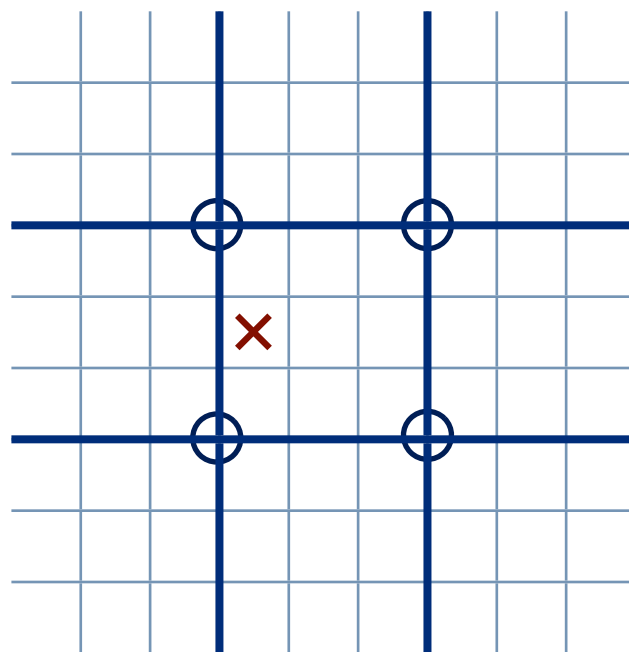
Concl.

5



2.3 Surface energy balance downscaling

Local regression of large-scale surface fields against the topography



High-resolution
precipitation

Surface scheme
LMDZ4

Sublimation
Melting

Off-line Refreezing



2.3 Surface energy balance downscaling

Goals

1

2

Valid.

3

Futur

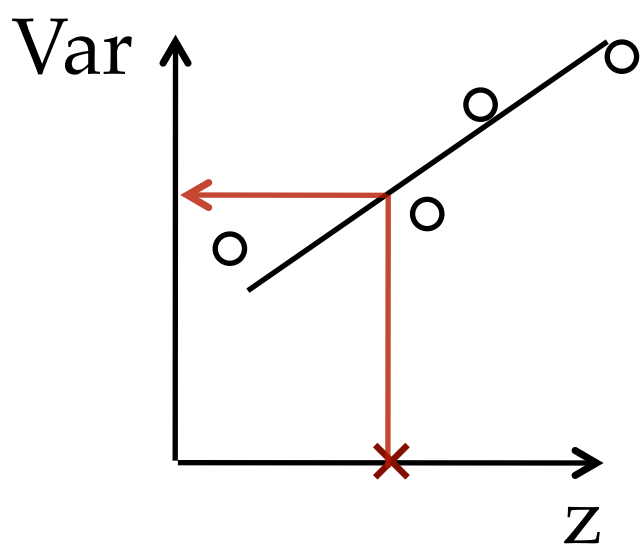
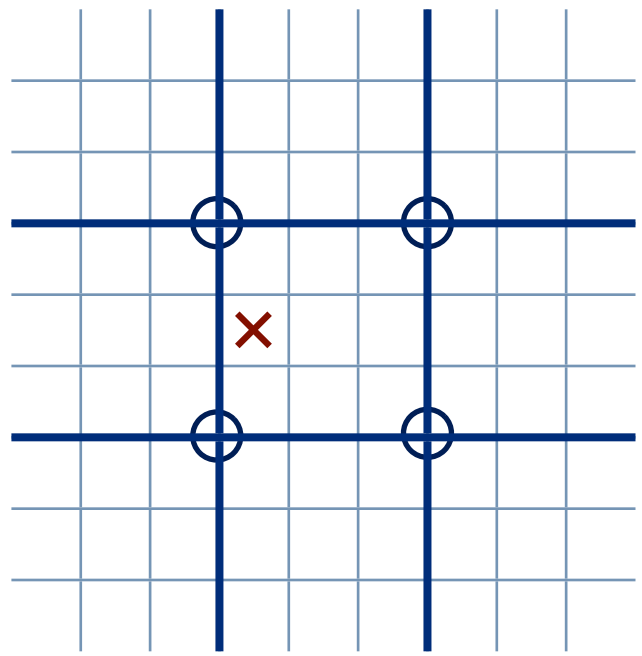
4

Concl.

5



Local regression of large-scale surface fields against the topography



High-resolution precipitation

Surface scheme
LMDZ4

SISVAT (full scheme)

Sublimation
Melting

Sublimation
Melting

Off-line Refreezing

Refreezing



3.1

Downscaling of an atmospheric global climate model

Goals

1

Model

2

3

Futur

4

Concl.

5

**LMDZ4**

French Global Circulation Model (IPCC 2007)

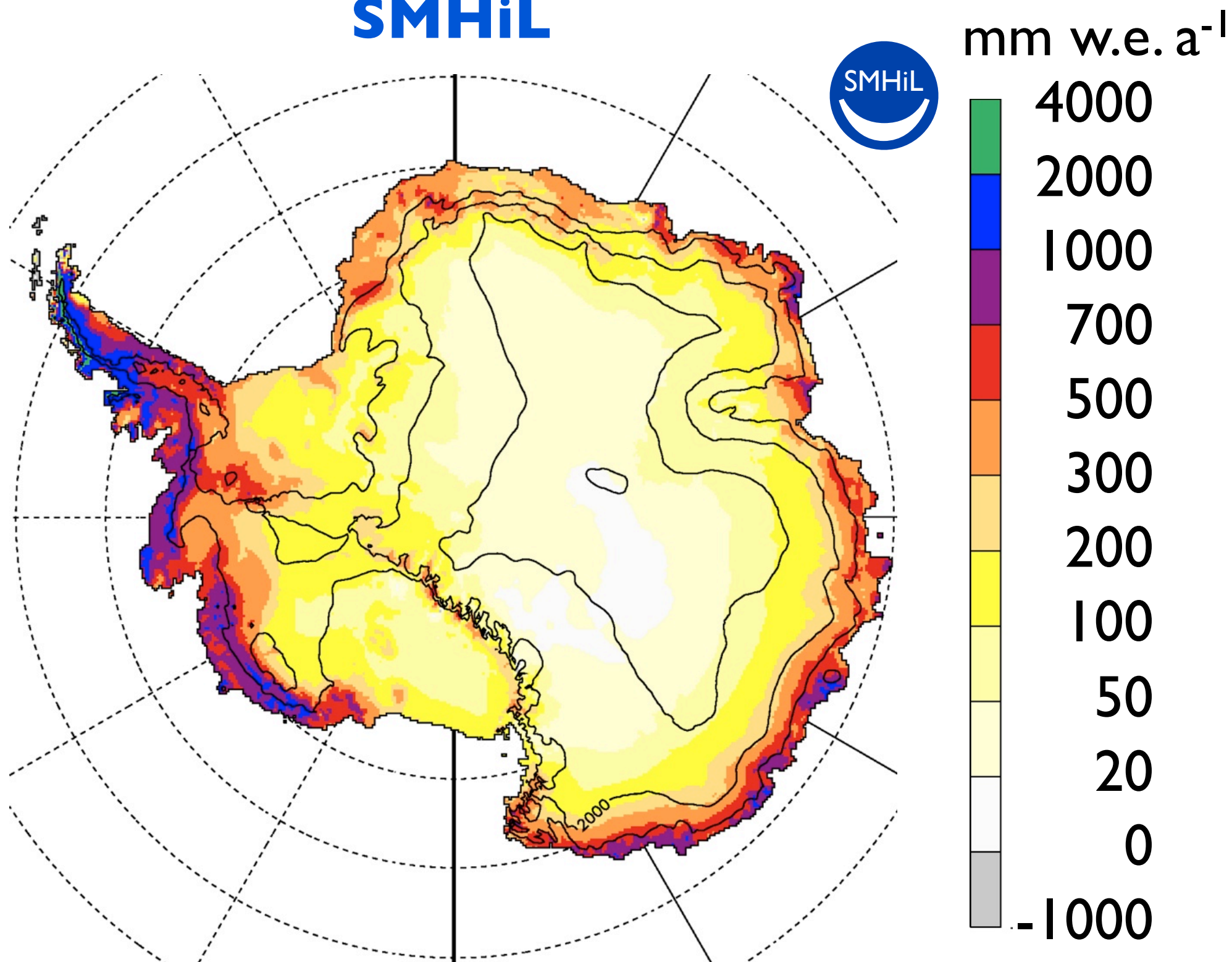
Zoomed on the Antarctic continent

Climatic runs (decadal variability)Antarctic resolution : **60 km** / Runs : **1980-2200**

3.2 Impact of downscaling on SMB estimation

SMB LMDZ4 1981-2000

SMHiL



Goals

1

Model

2

3

Futur

4

Concl.

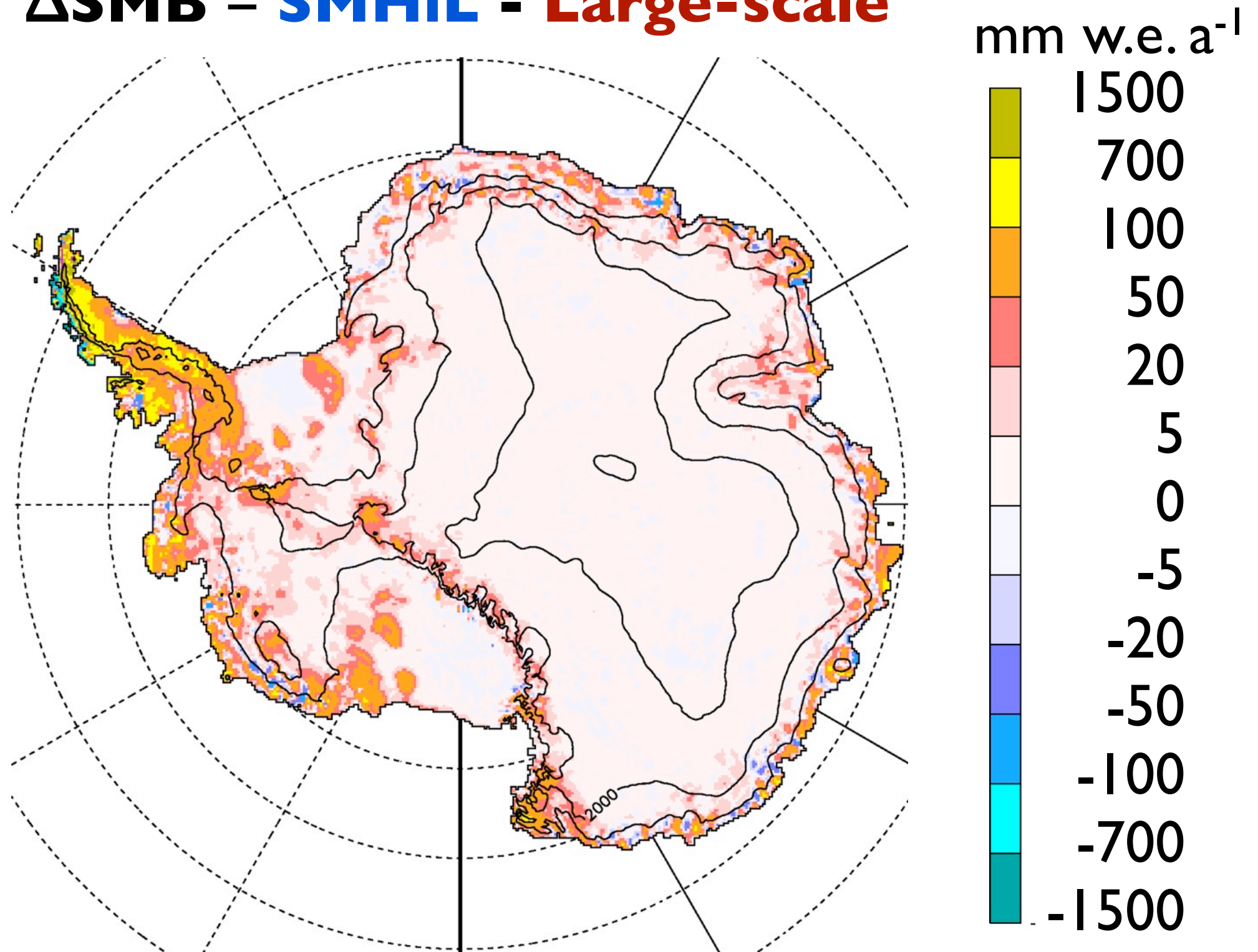
5



3.2 Impact of downscaling on SMB estimation

SMB LMDZ4 1981-2000

$$\Delta\text{SMB} = \text{SMHiL} - \text{Large-scale}$$



Goals

1

Model

2

3

Futur

4

Concl.

5



3.2 Impact of downscaling on SMB estimation

Contribution of present Antarctic SMB to sea-level changes

LMDZ4

Large-scale
- 5,6 mm/yr

SMHiL
- 6,5 mm/yr (+17%)
(- **0,9 mm/yr**)

ERA-Interim

Large-scale
- 4,4 mm/yr

SMHiL
- 5,5 mm/yr (+26%)
(- **1 mm/yr**)

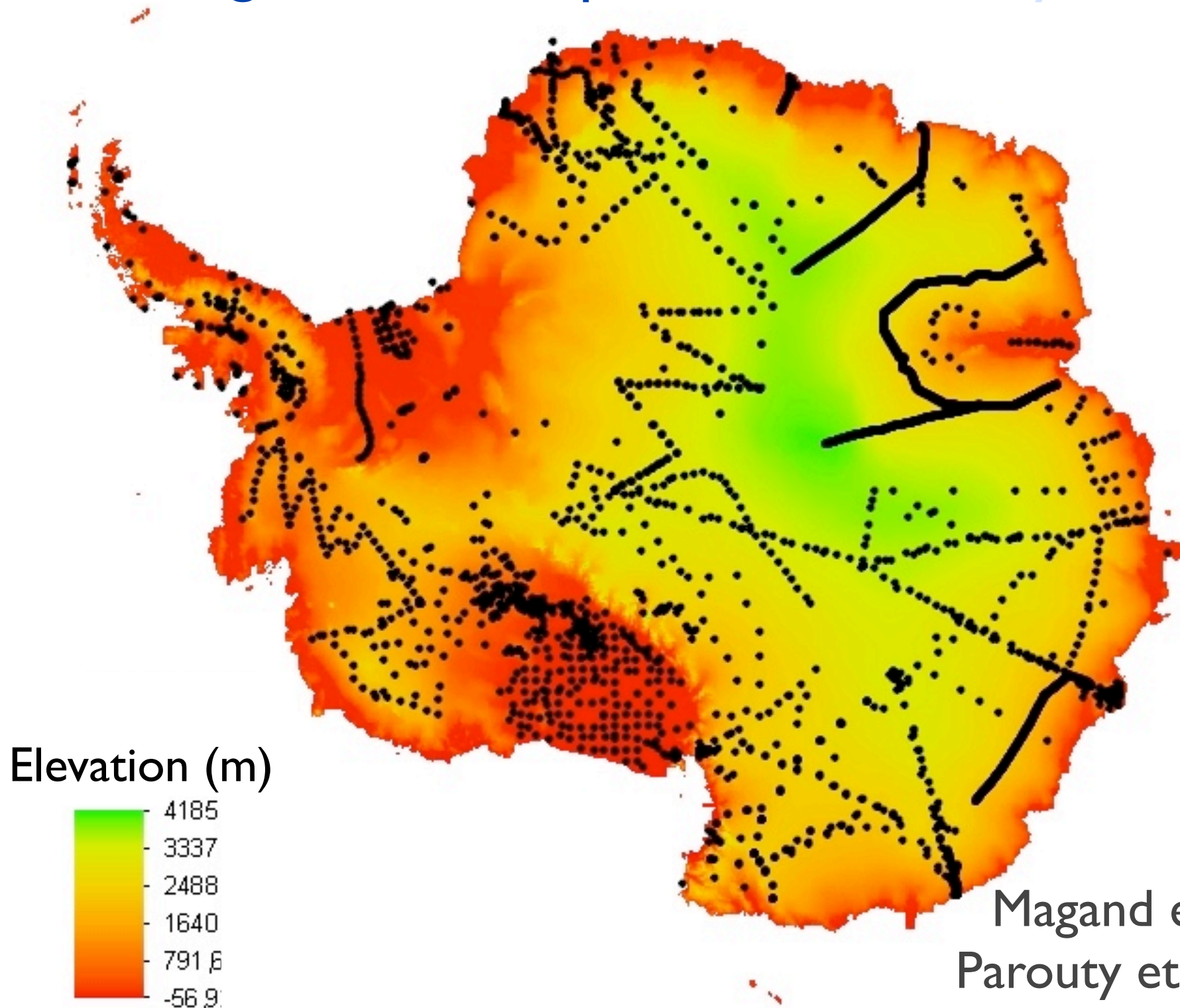
Significantly different
How to validate it ?



3.3 Comparison to observations

SMB observations

Climatological scale / Up-to-date / Quality-controlled



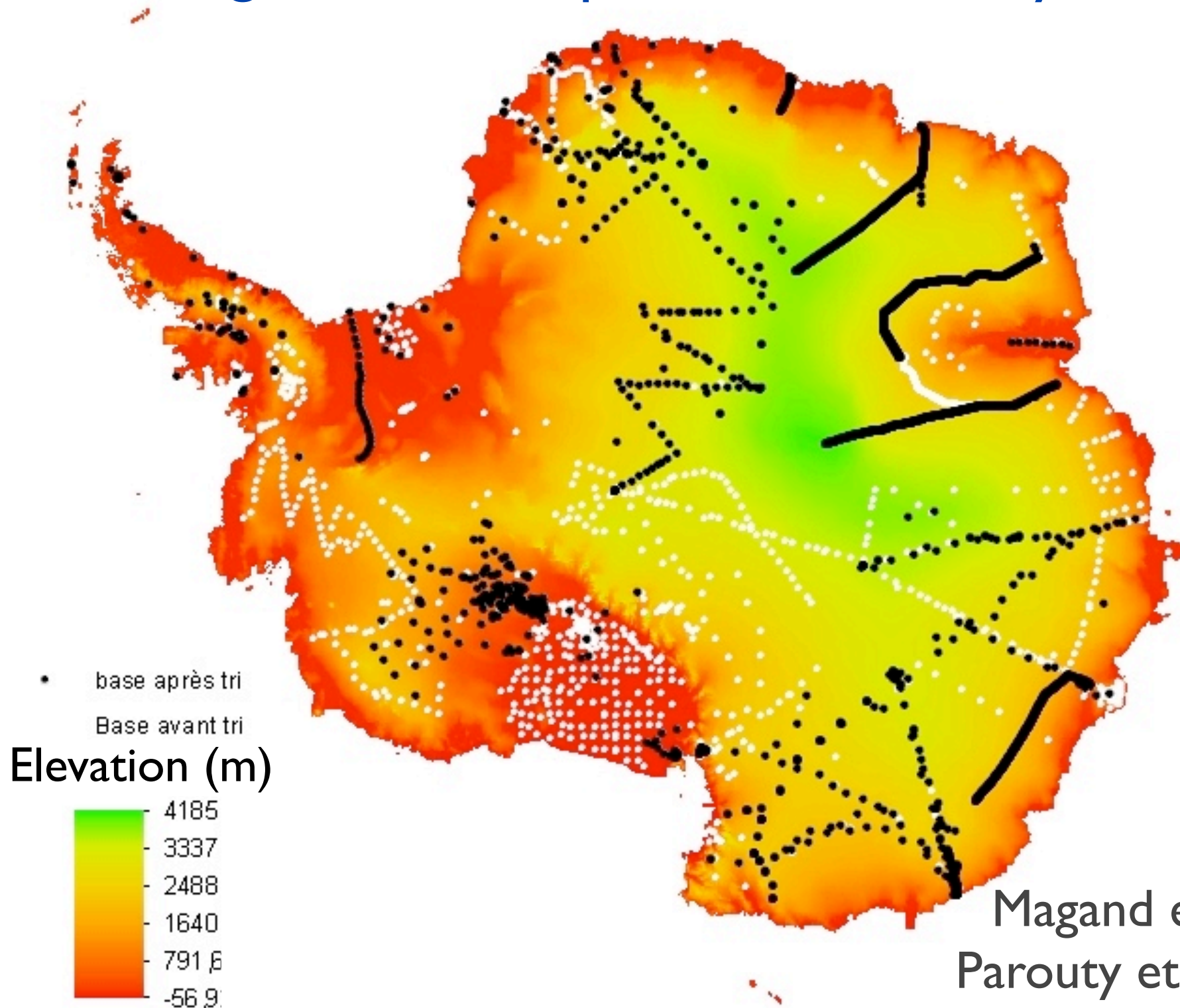
Magand et al. (2007)
Parouty et al. (en prep.)



3.3 Comparison to observations

SMB observations

Climatological scale / Up-to-date / Quality-controlled

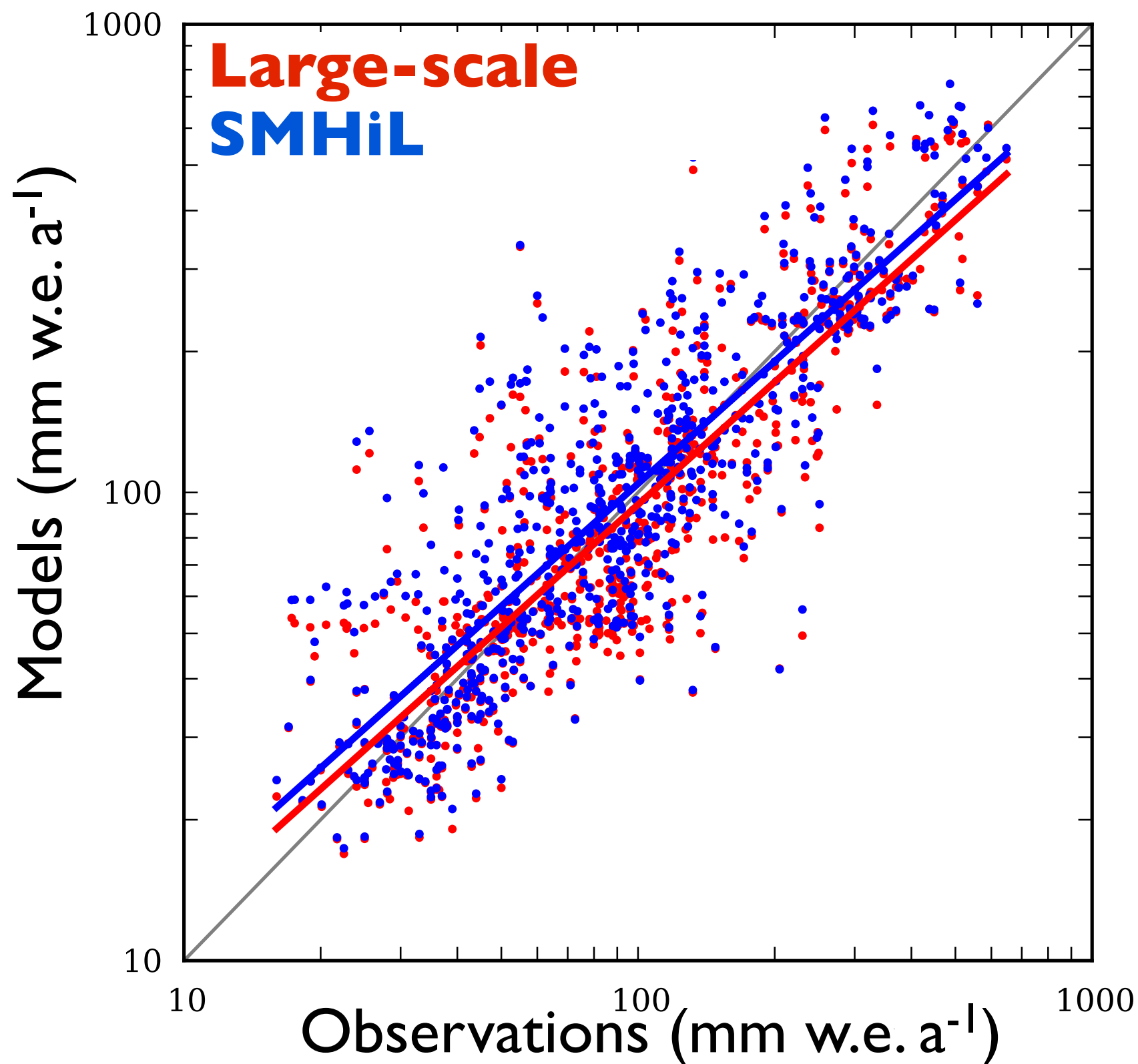


Magand et al. (2007)
Parouty et al. (en prep.)



3.3 Comparison to observations

SMB LMDZ4 1981-2000



Goals

1

Model

2

3

Futur

4

Concl.

5



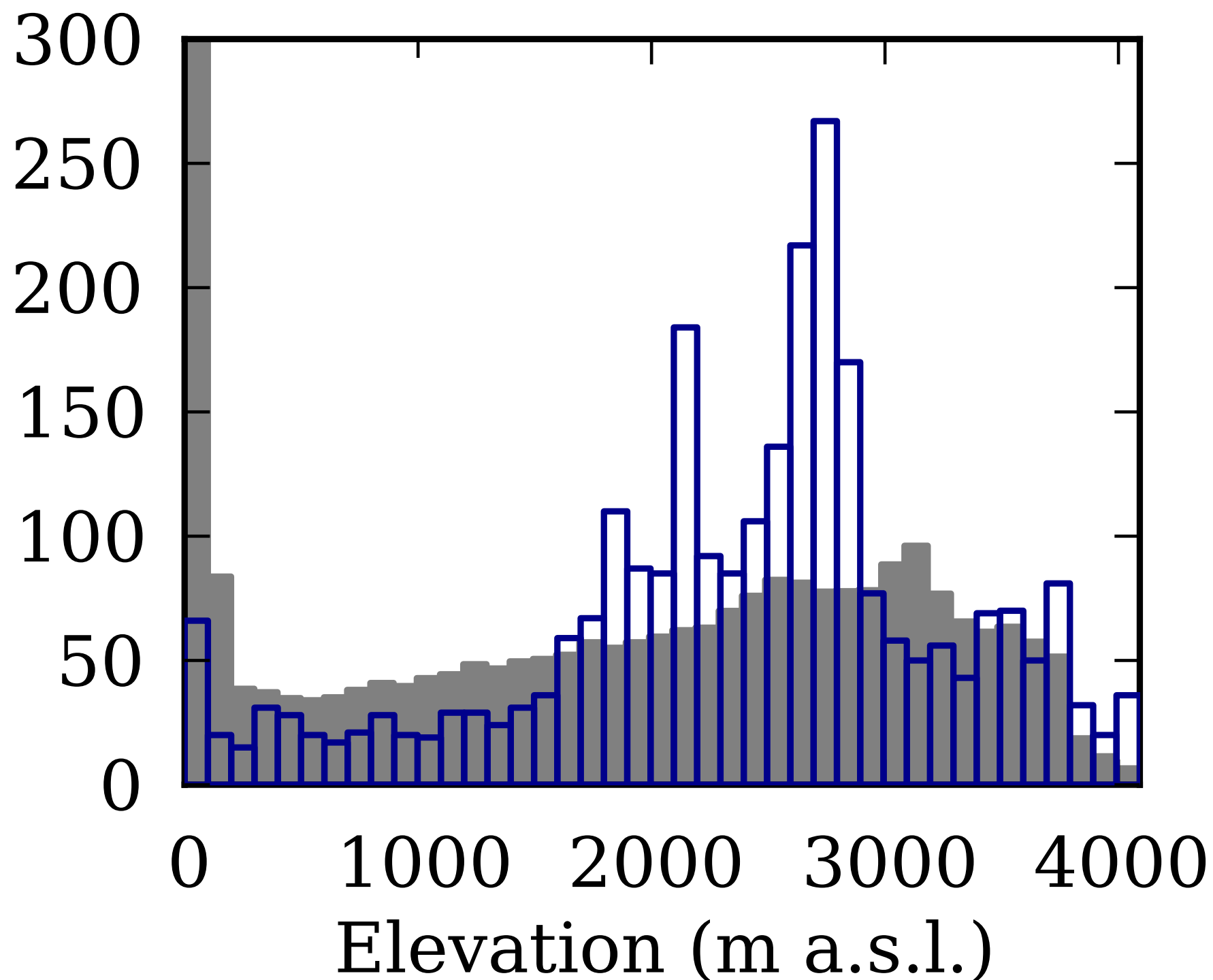
16/07/12

12

3.3 Comparison to observations

Observations number
by elevation bins

Normalized surface
by elevation bins



Goals

1

Model

2

3

Futur

4

Concl.

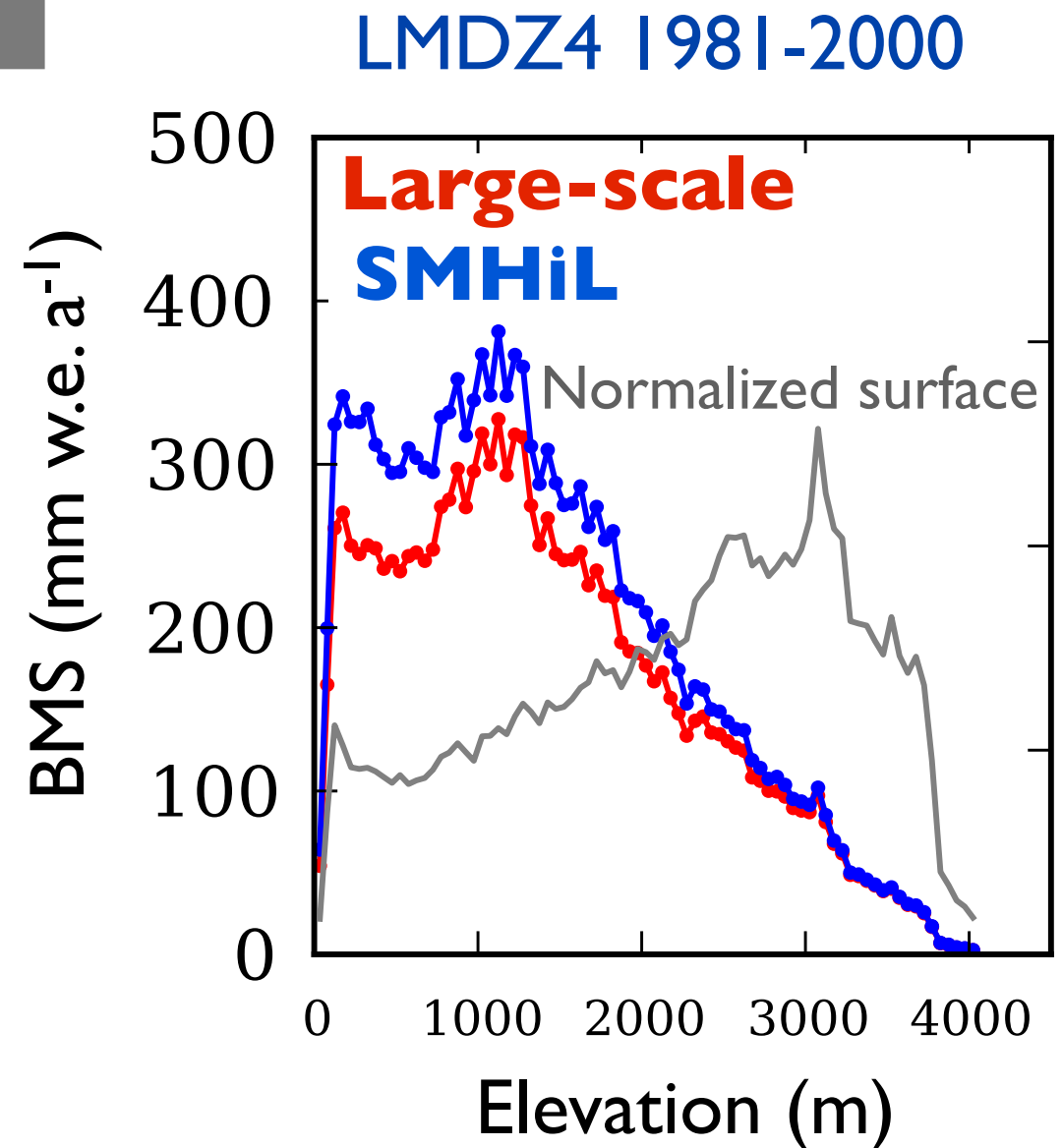
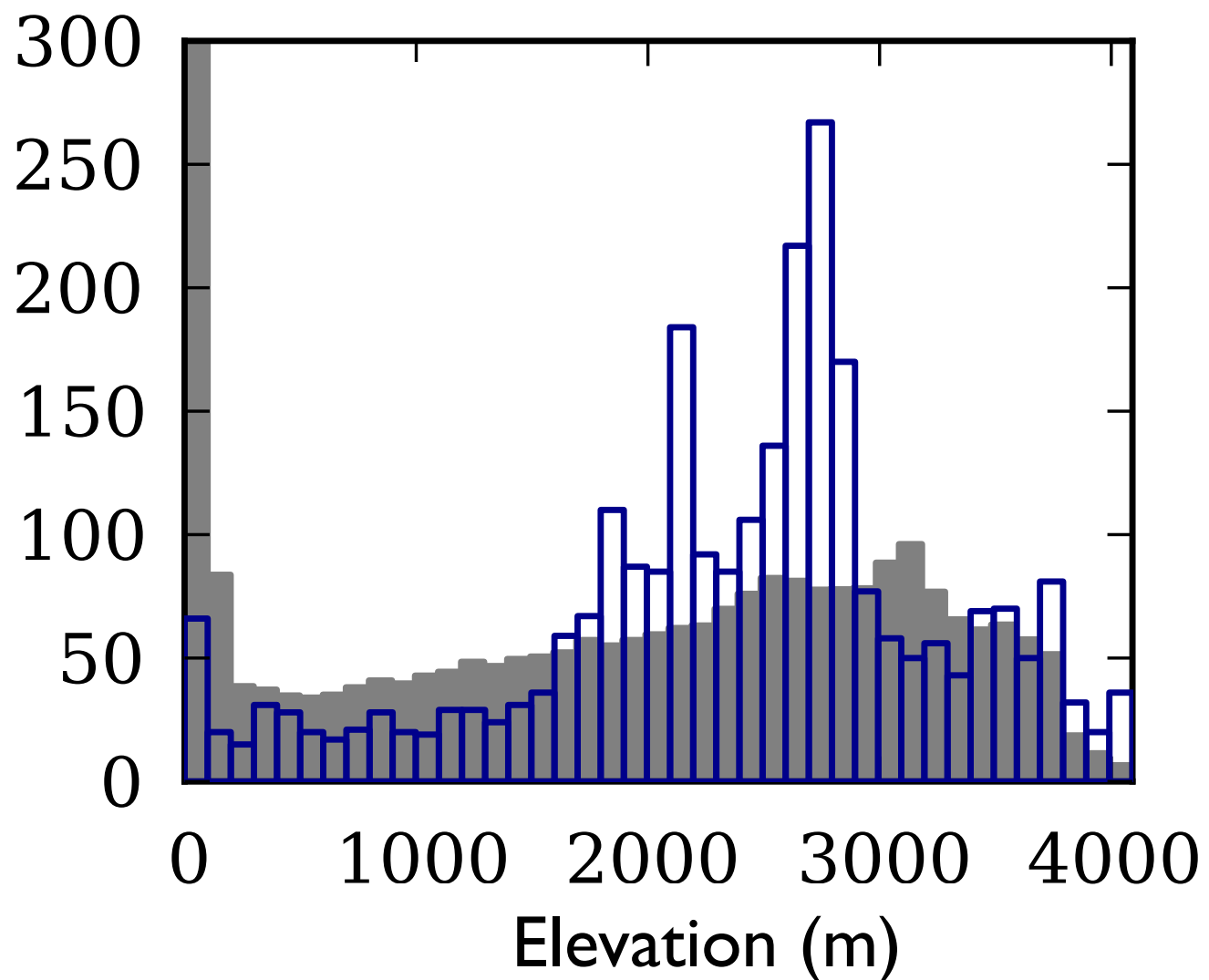
5



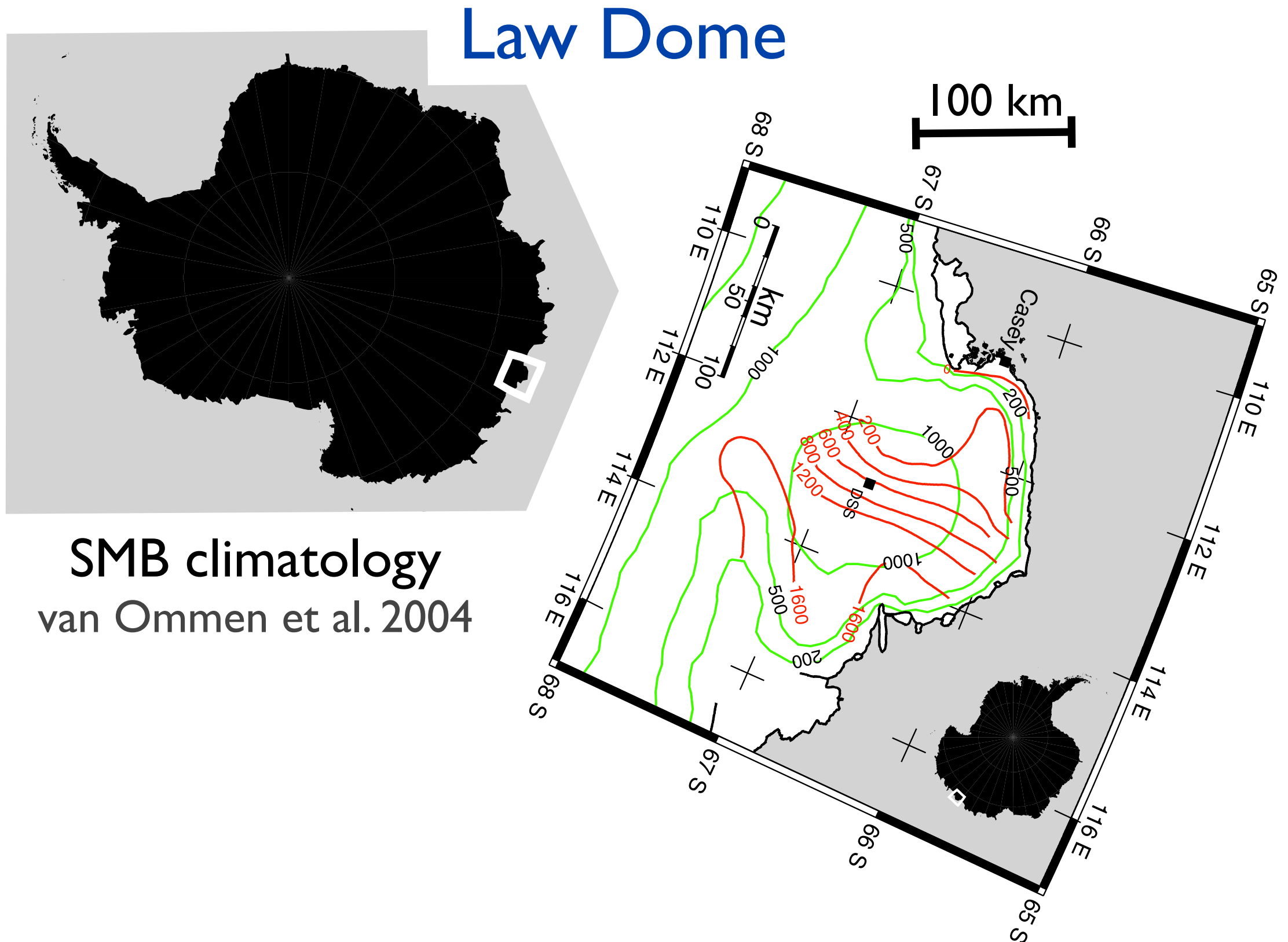
3.3 Comparison to observations

Observations number
by elevation bins

Normalized surface
by elevation bins



3.4 Validation over Law Dome



Goals

1

Model

2

3

Futur

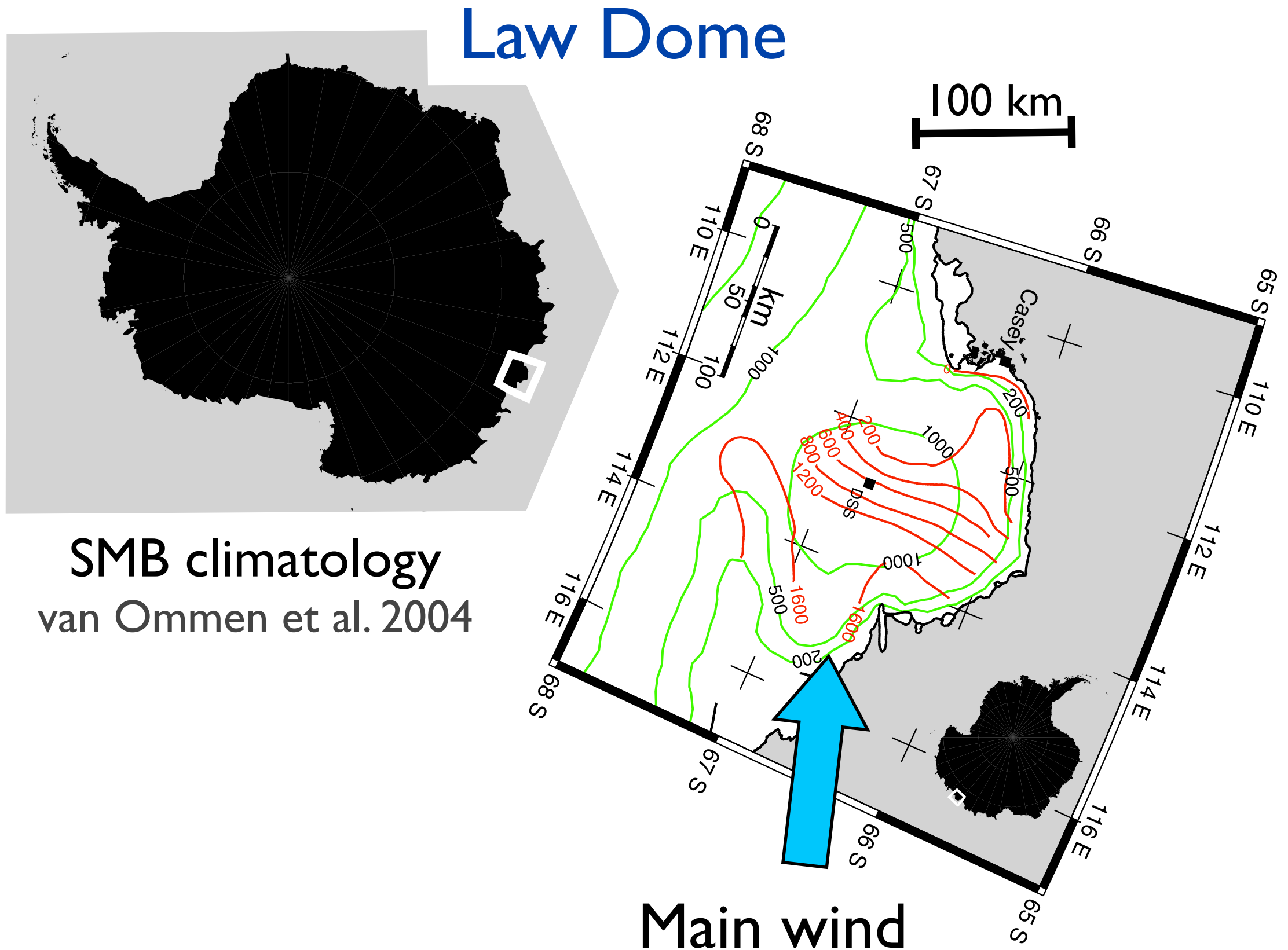
4

Concl.

5



3.4 Validation over Law Dome



3.4 Validation over Law Dome

Goals

1

Model

2

3

Futur

4

Concl.

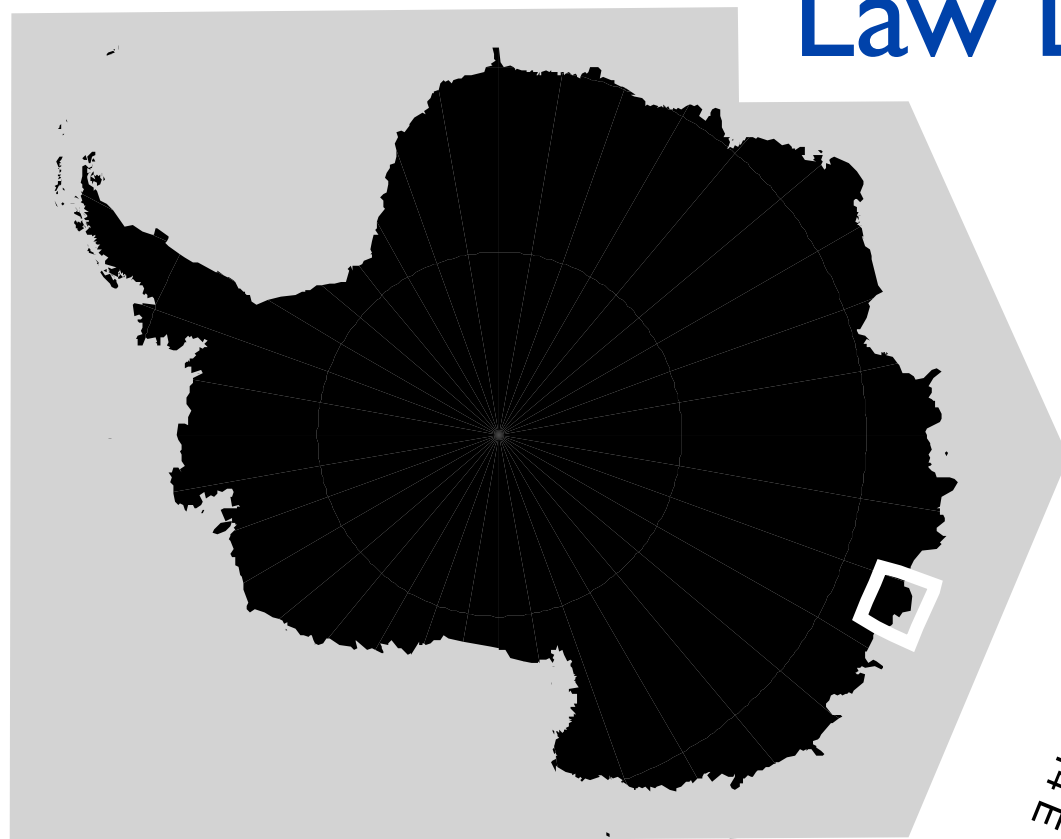
5



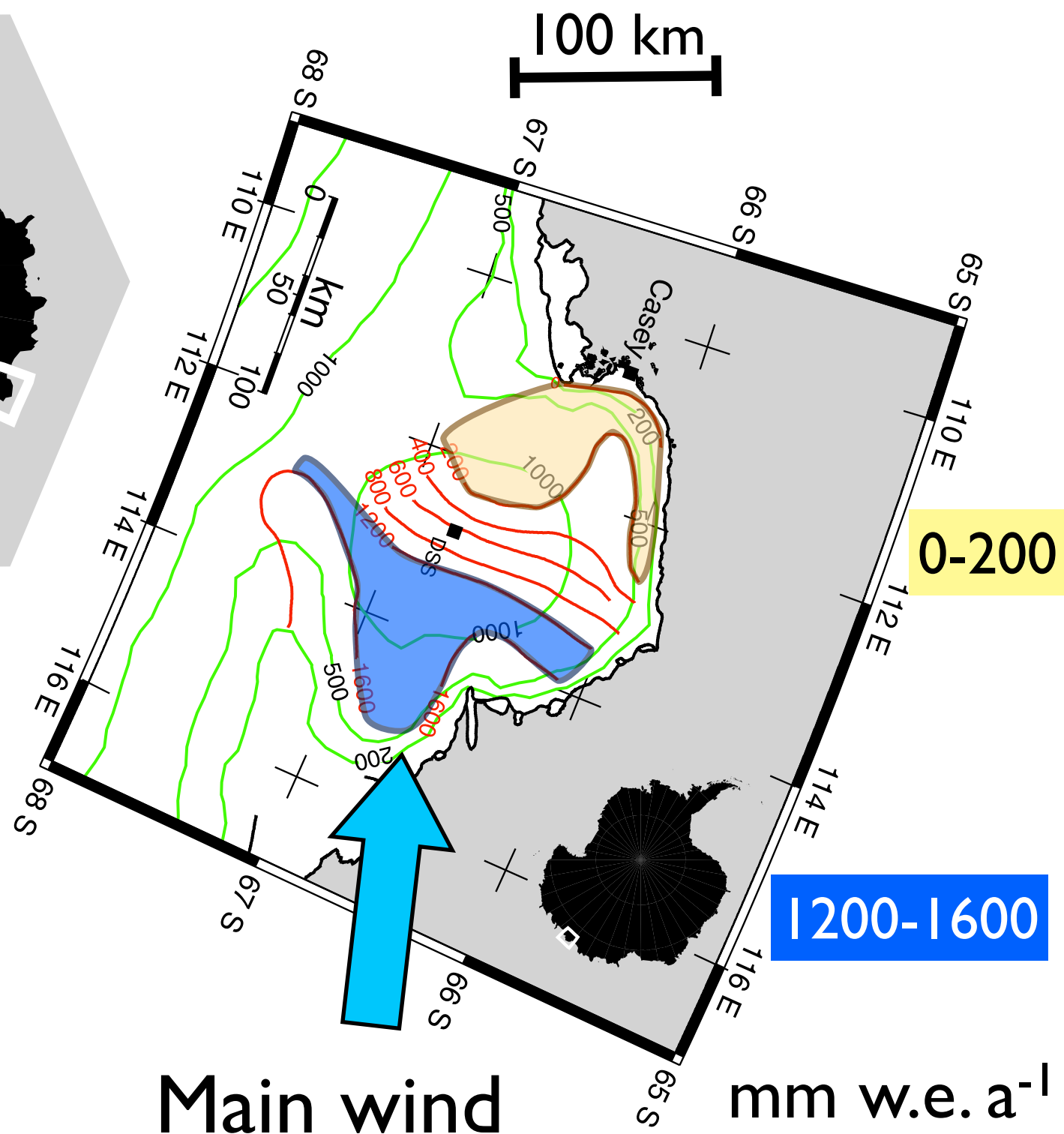
16/07/12

14

Law Dome



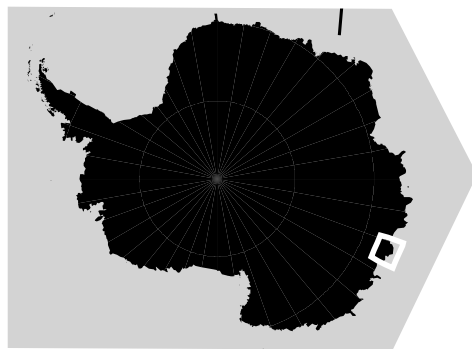
SMB climatology
van Ommen et al. 2004



Main wind

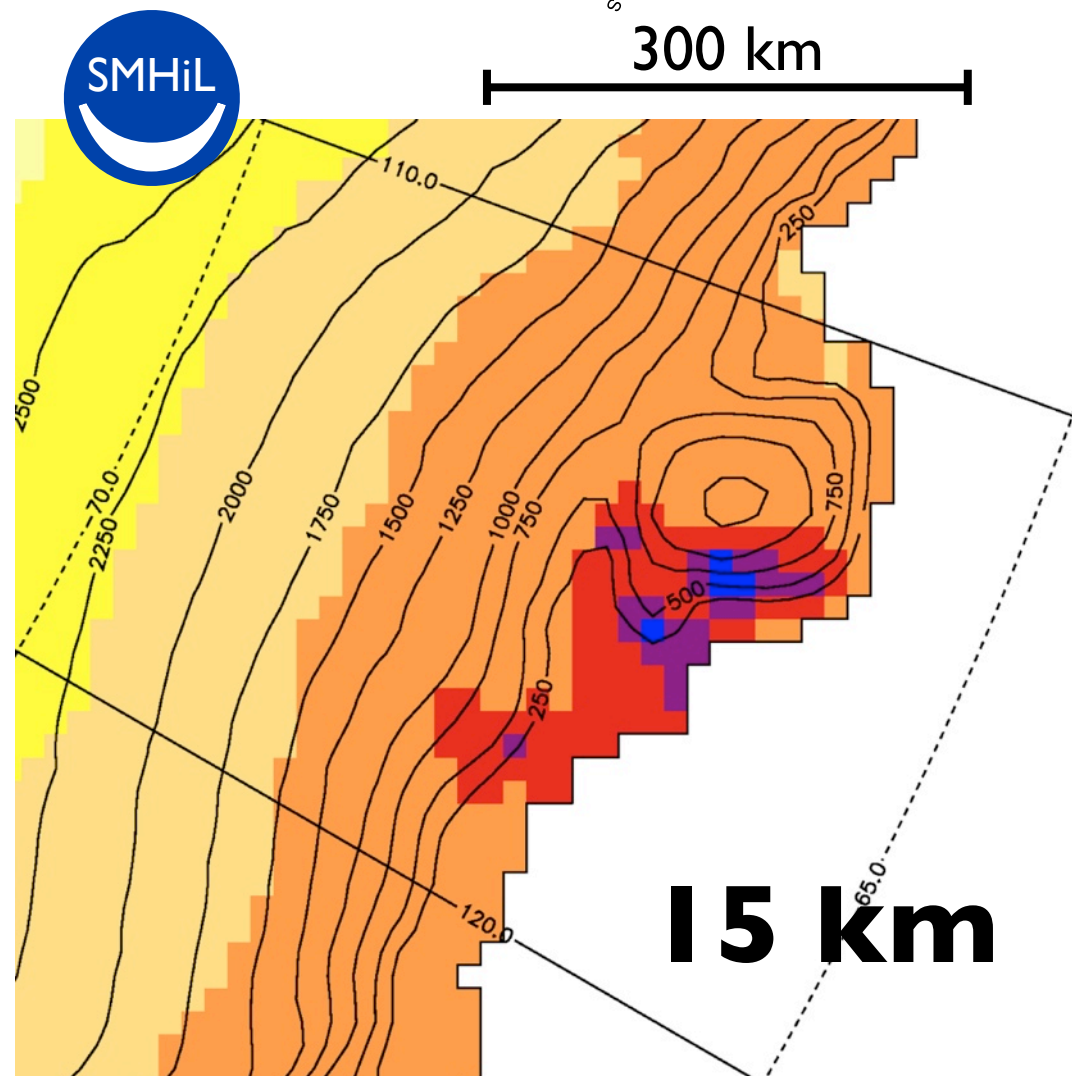
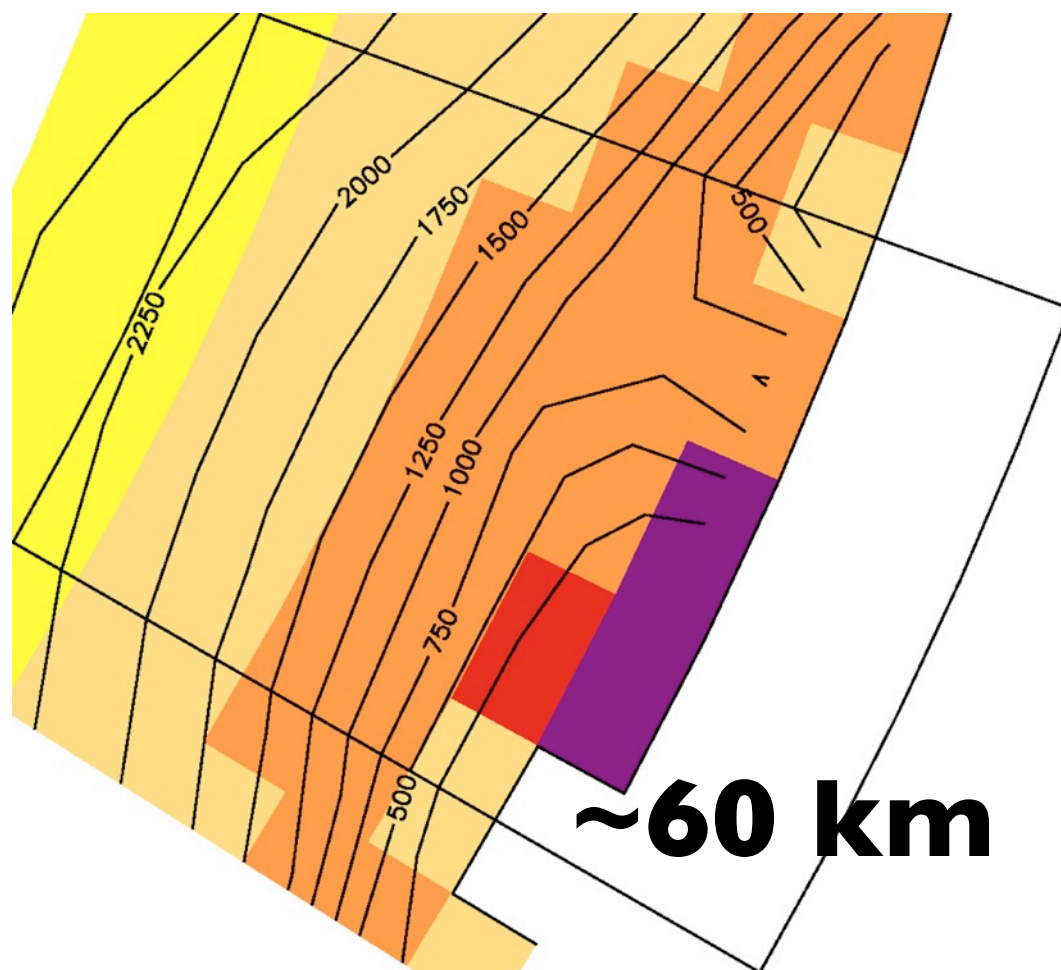
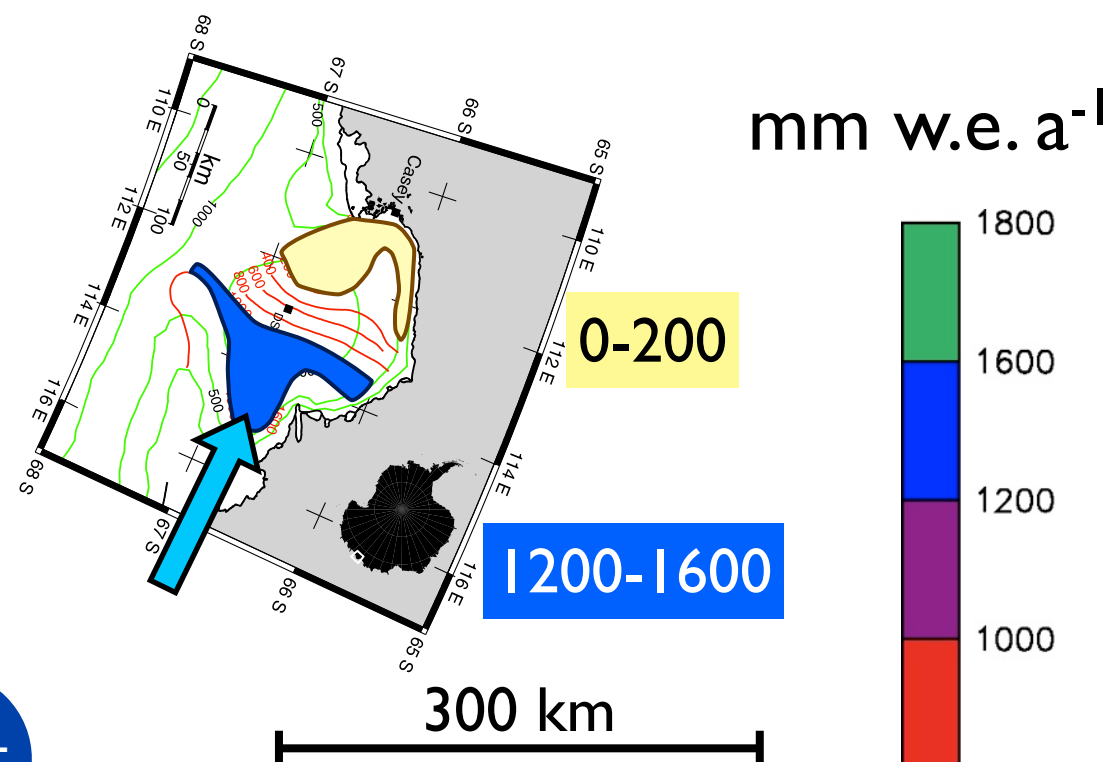
mm w.e. a⁻¹

3.4 Validation over Law Dome



Law Dome

LMDZ4, 1981-2000
SMB



3.4 Validation over Law Dome

Goals

1

Model

2

3

Futur

4

Concl.

5



Spatial pattern and intensity better displayed

Air drying to be improved

Linked to **large-scale model** processes and resolution

4.1 Scenarios and forcings

LMDZ4

Atmospheric global climate model

End of the
20th century

21st century
22nd century

Green-house gases
emission scenarios

Observations

AIB «*Realistic*»
EI «*Optimistic*»

Ocean forcings
Sea surface temperature
Sea-ice concentration

Observations

HADCM3
ECHAM5
Anomalies

→ **700 years**

Goals

1

Model

2

Valid.

3

4

Concl.

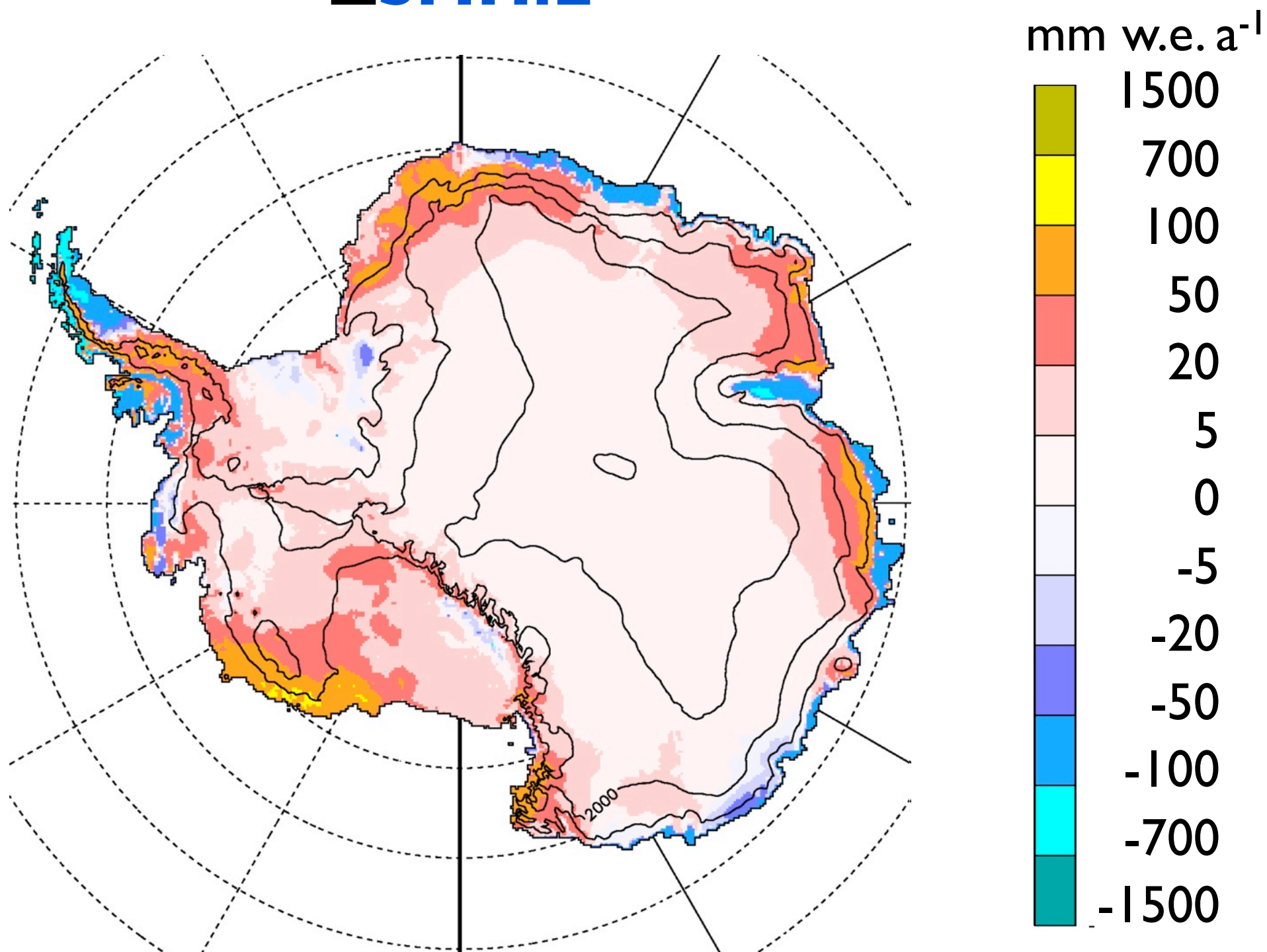
5



4.2 SMB evolution

AIB
HADCM3

$$\Delta = \text{SMB End 21st} - \text{SMB End 20th century}$$

 ΔSMHiL 

Goals

1

Model

2

Valid.

3

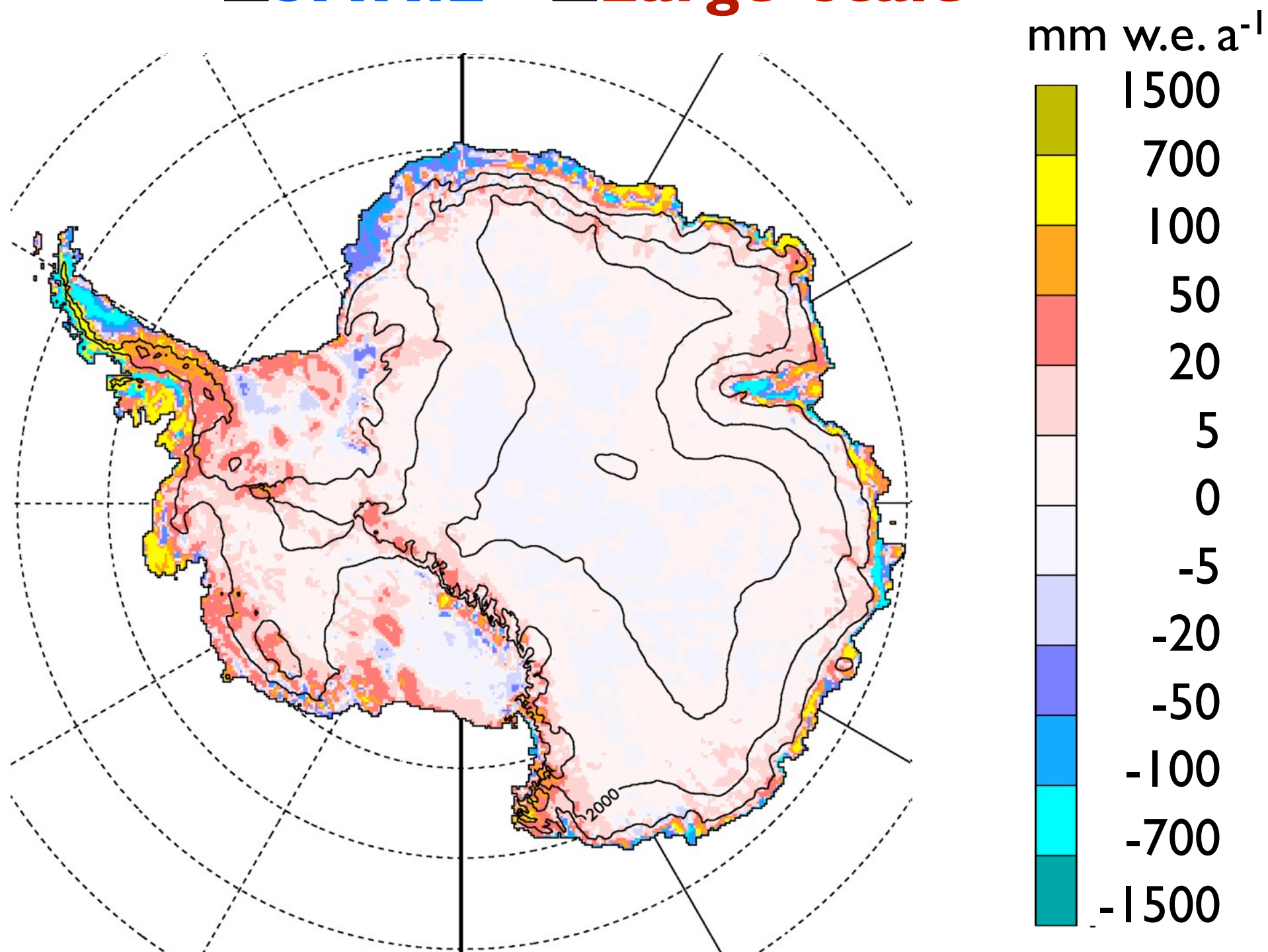
4

Concl.

5



4.2 SMB evolution

AIB
HADCM3 $\Delta = \text{SMB End 21st} - \text{SMB End 20th century}$ $\Delta \text{SMHiL} - \Delta \text{Large-scale}$ 

Goals

1

Model

2

Valid.

3

4

Concl.

5

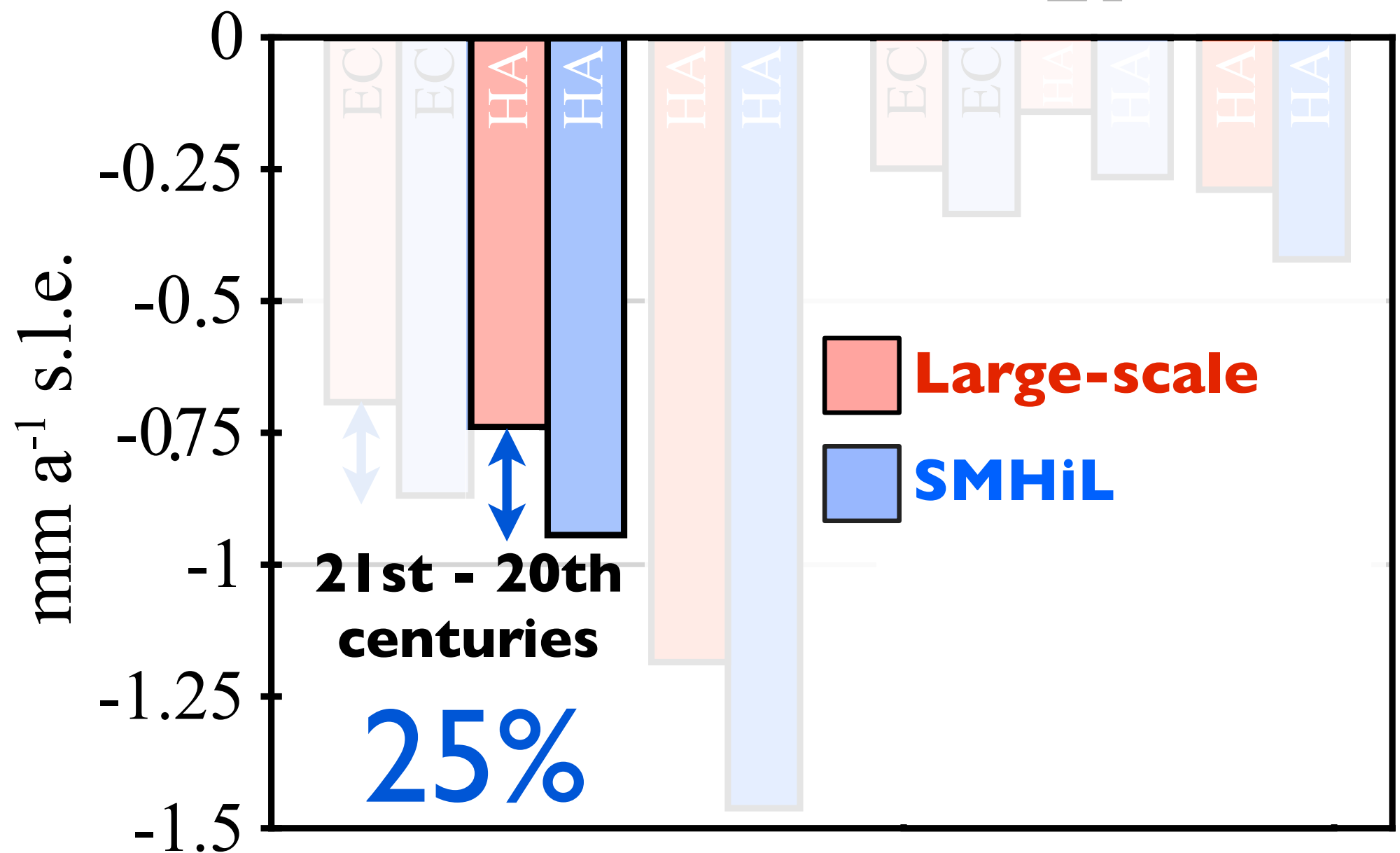


4.3 SMB contribution to sea-level changes

LMDZ4EC = ECHAM5
HA = HADCM3

A1 B scenario

E1



4.3 SMB contribution to sea-level changes

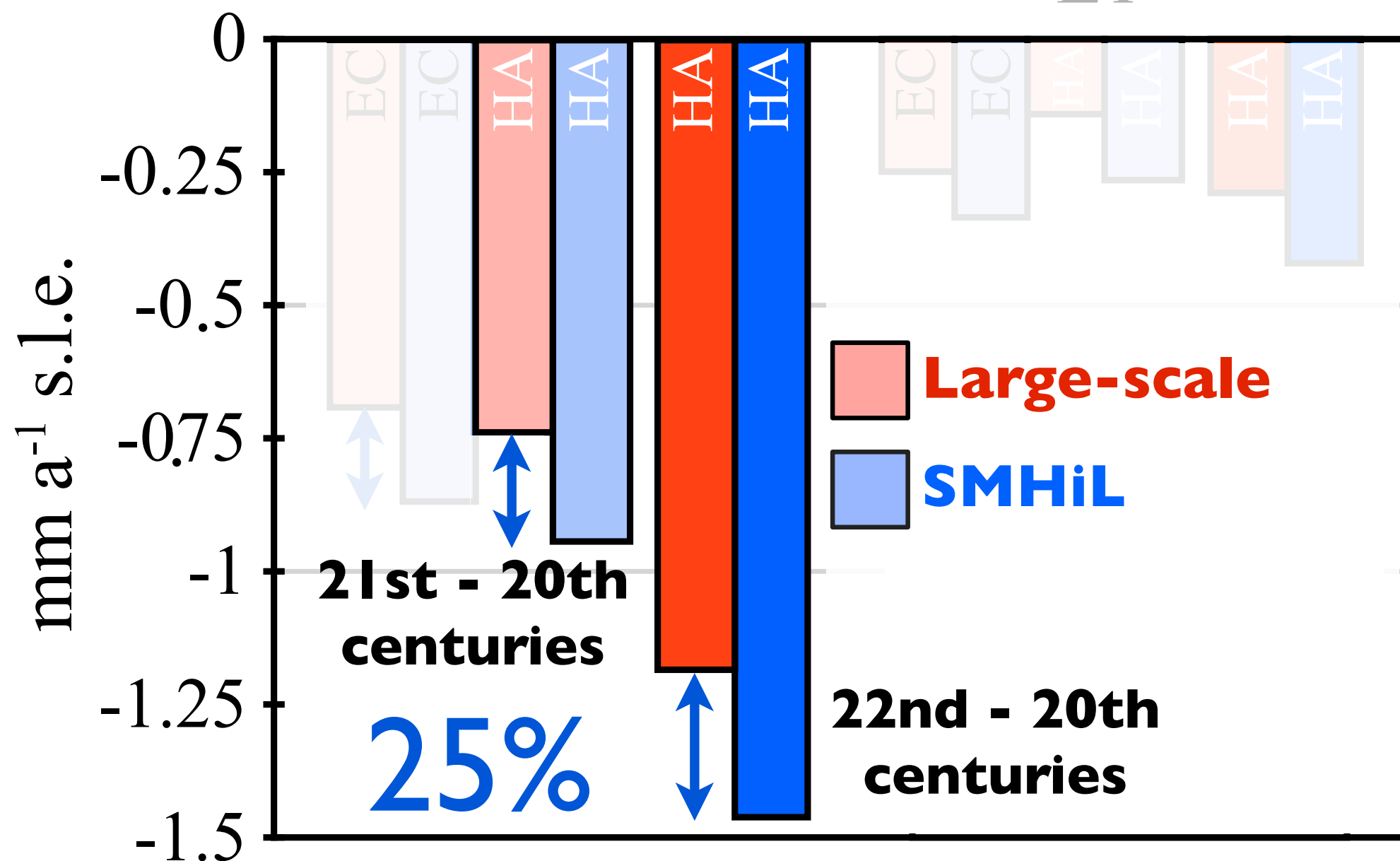
LMDZ4

EC = ECHAM5

HA = HADCM3

A1 B scenario

E1



Conclusions

Goals

1

Model

2

Valid.

3

Futur

4

5



SMHiL

Based on physical parametrisation

Performant over ice-sheets

Fast computing



Conclusions

Goals

1

Model

2

Valid.

3

Futur

4

5



SMHiL

Based on physical parametrisation

Performant over ice-sheets

Fast computing



Compute the impact of the high-resolution topography
on surface mass balance

Highest resolution ever tested
for climatic runs over Antarctica



**High-resolution SMB (present / evolution)
significantly different from large-scale SMB**

To be implemented

Humidity advection

Snow drift ?

Under-representation of observation in low-elevation areas
where the SMB variability/amount is the highest

Crutial need of observations :

In coastal areas / Large spatial extent / Long-term measurements

Other methods for downscaling validation :

Comparison to a regional climate model

**High-resolution SMB (present / evolution)
significantly different from large-scale SMB**

To be implemented

Humidity advection

Snow drift ?

**Under-representation of observation in low-elevation areas
where the SMB variability/amount is the highest**

Crutial need of observations :

In coastal areas / Large spatial extent / Long-term measurements

Other methods for downscaling validation :

Comparison to a regional climate model



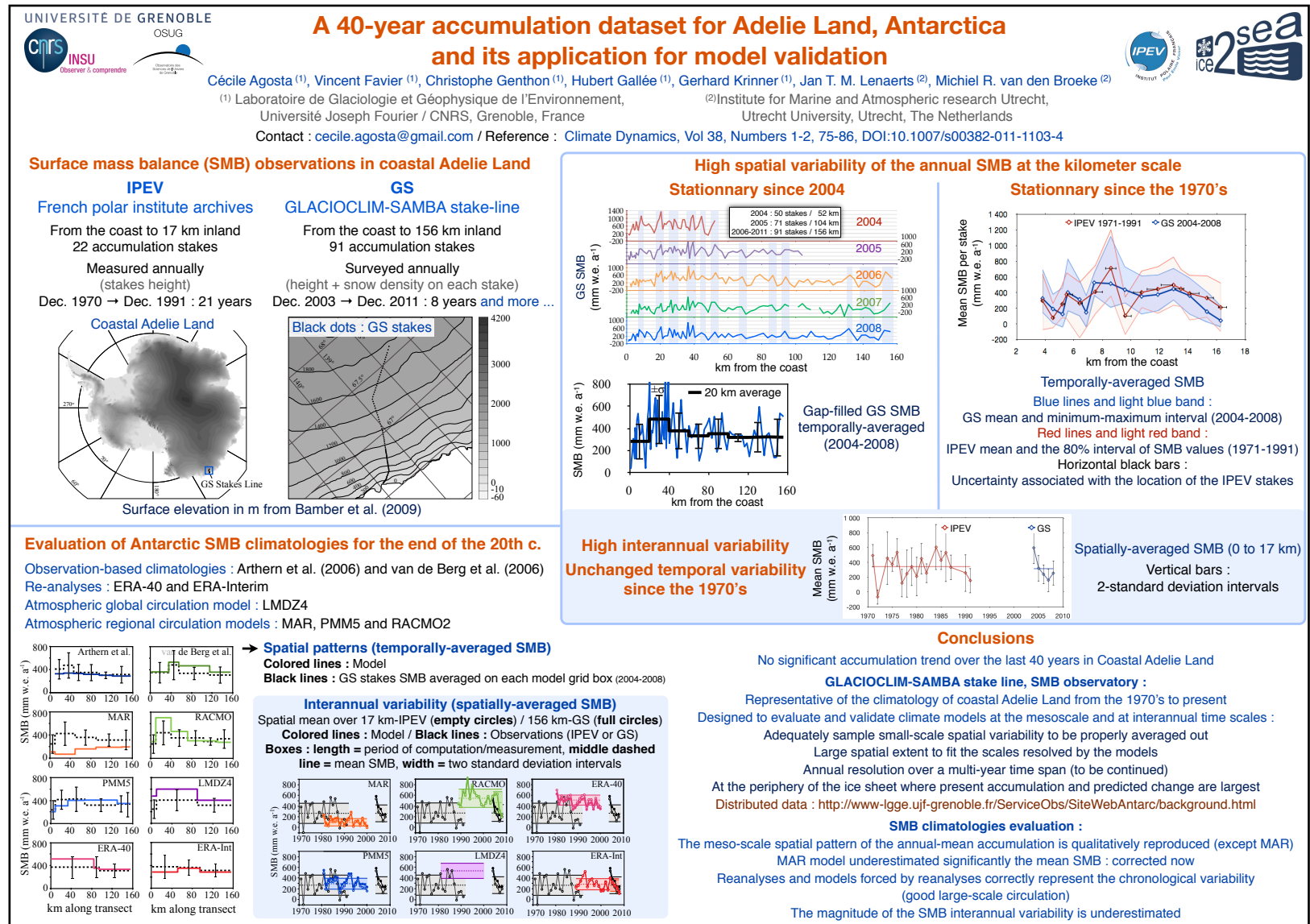


Poster :

32. Observing Antarctica and the Southern Ocean

Wednesday 18th

A 40-year accumulation dataset for Adelie Land, Antarctica and its application for model validation



Thank you



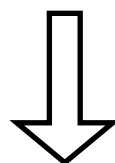
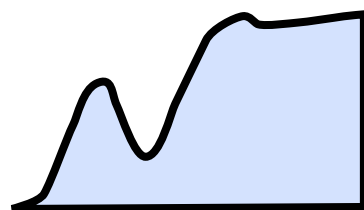
Merci



1.3 Aim of the downscaling ?

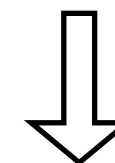
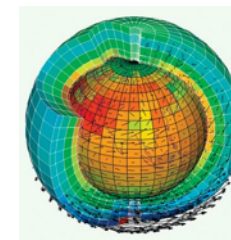
Surface mass balance downscaling

High-resolution
topography



Complex models outputs

Physics + / Resolution -



Simplified physical equations

Limited computational costs



High-resolution SMB

from various large-scale climate models

1

Modèle

2

Valid.

3

Futur

4

Concl.

5



5

Perspectives

Enjeu

1

Modèle

2

Valid.

3

Futur

4

5



Thèse de Déborah Verfaillie :

Régionalisation du BMS sur la péninsule Antarctique et Kerguelen

Implantation de l'advection ...

Stratégie d'utilisation de SMHiL :

*SMHiL ~15km*Meilleur **modèle atmosphérique régional** sur l'Antarctique
(processus polaires)*MAR ? ~40km*Meilleur modèle de **climat global** sur l'Antarctique
(circulation présente)*A choisir parmi les modèles de CMIP5 ~80km*

Régionalisation du BMS pour les modèles d'écoulement

Intermédiaire entre modèle atmosphérique et modèle de calotte

Groenland/Antarctique, siècle/milliers d'années

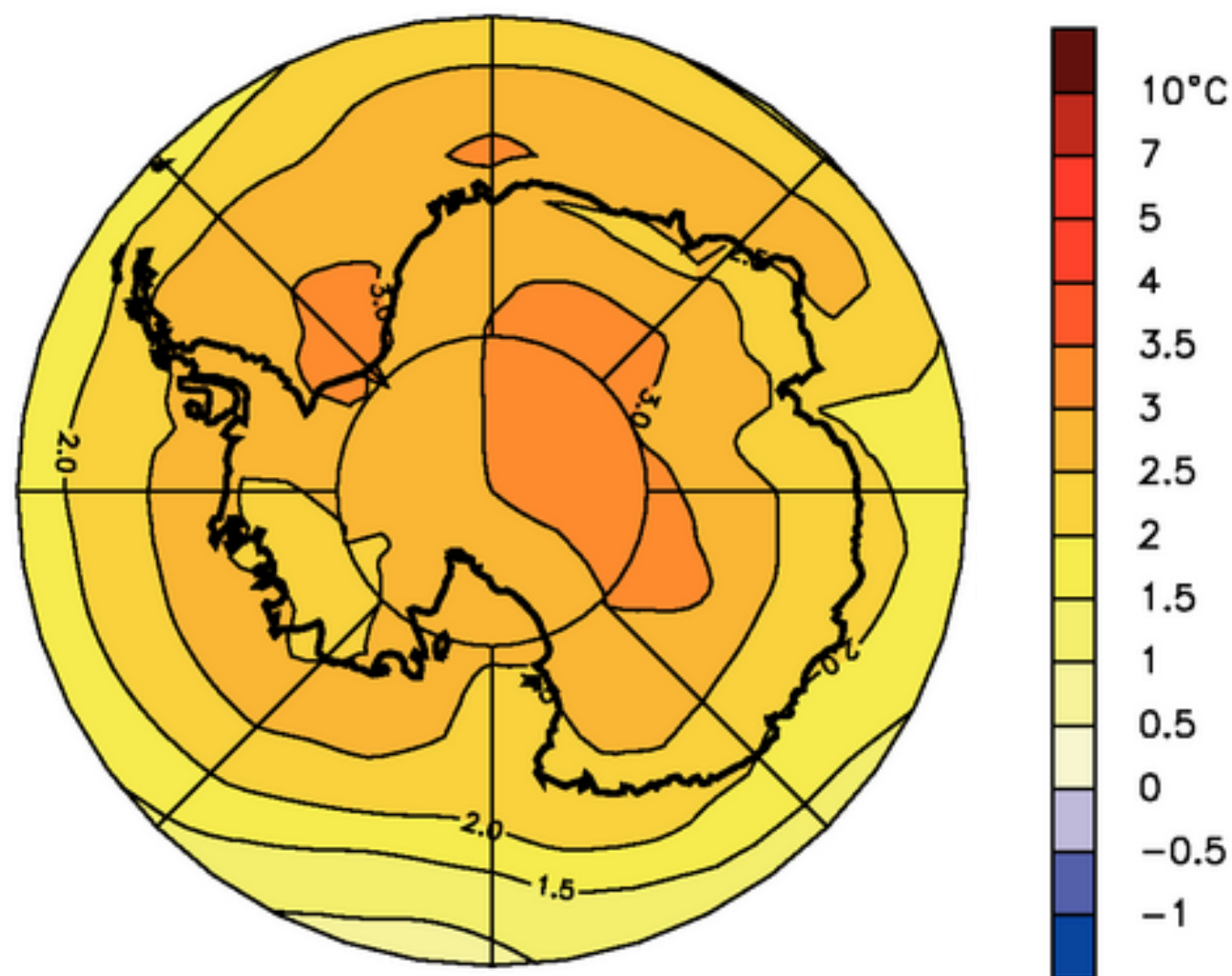
1.2 Mass balance uncertainties

Evolution for the next centuries ?

Global warming

End 21st c. - End 20th c.

Multi-model mean, IPCC 2007 (A1B scenario)



1

Modèle

2

Valid.

3

Futur

4

Concl.

5



1.2 Mass balance uncertainties

Evolution for the next centuries ?

Global warming

End 21st c. - End 20th c.

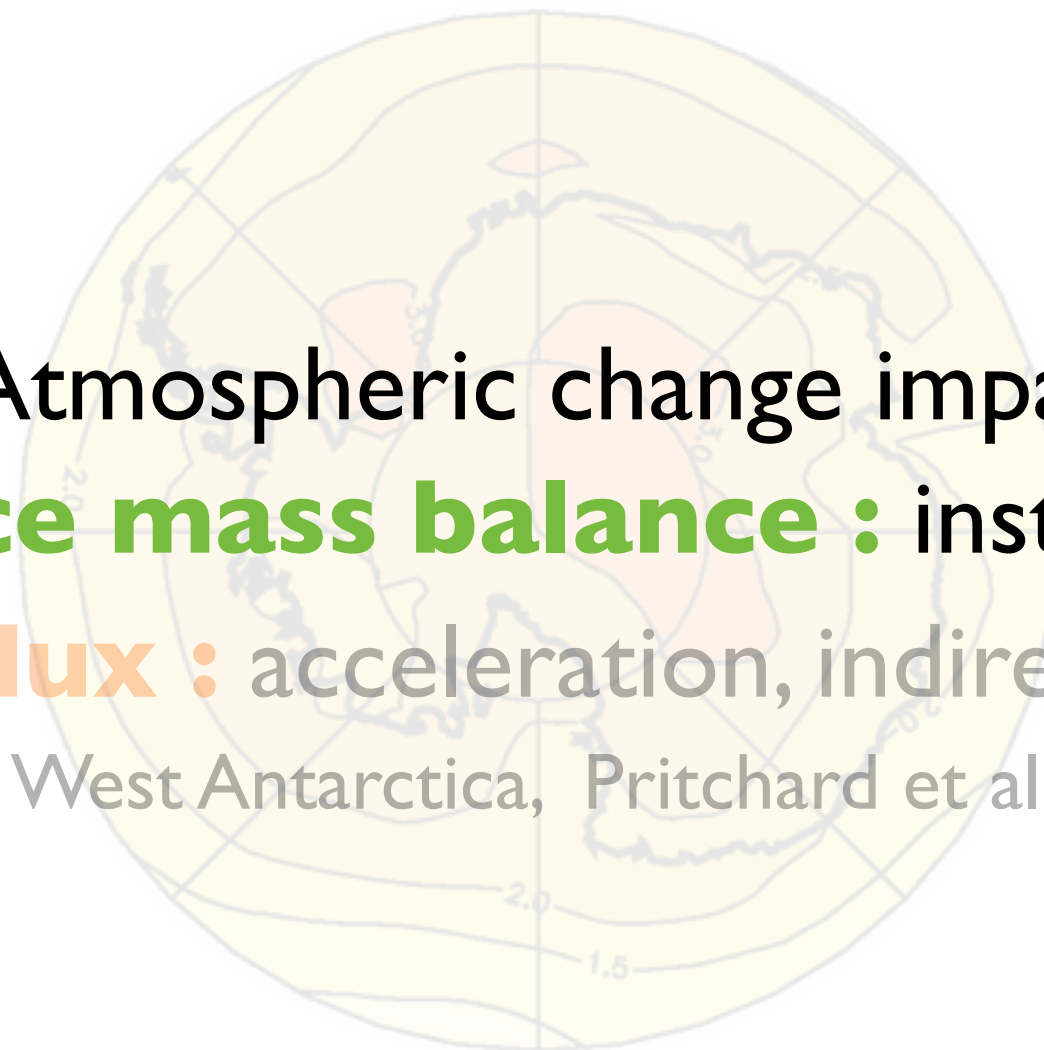
Multi-model mean, IPCC 2007 (A1B scenario)

Atmospheric change impact :

Surface mass balance : instantaneous

Ice flux : acceleration, indirect effect

(in West Antarctica, Pritchard et al. 2012)



1

Modèle

2

Valid.

3

Futur

4

Concl.

5



1.2 Mass balance uncertainties

Evolution for the next centuries ?

Global warming

End 21st c. - End 20th c.

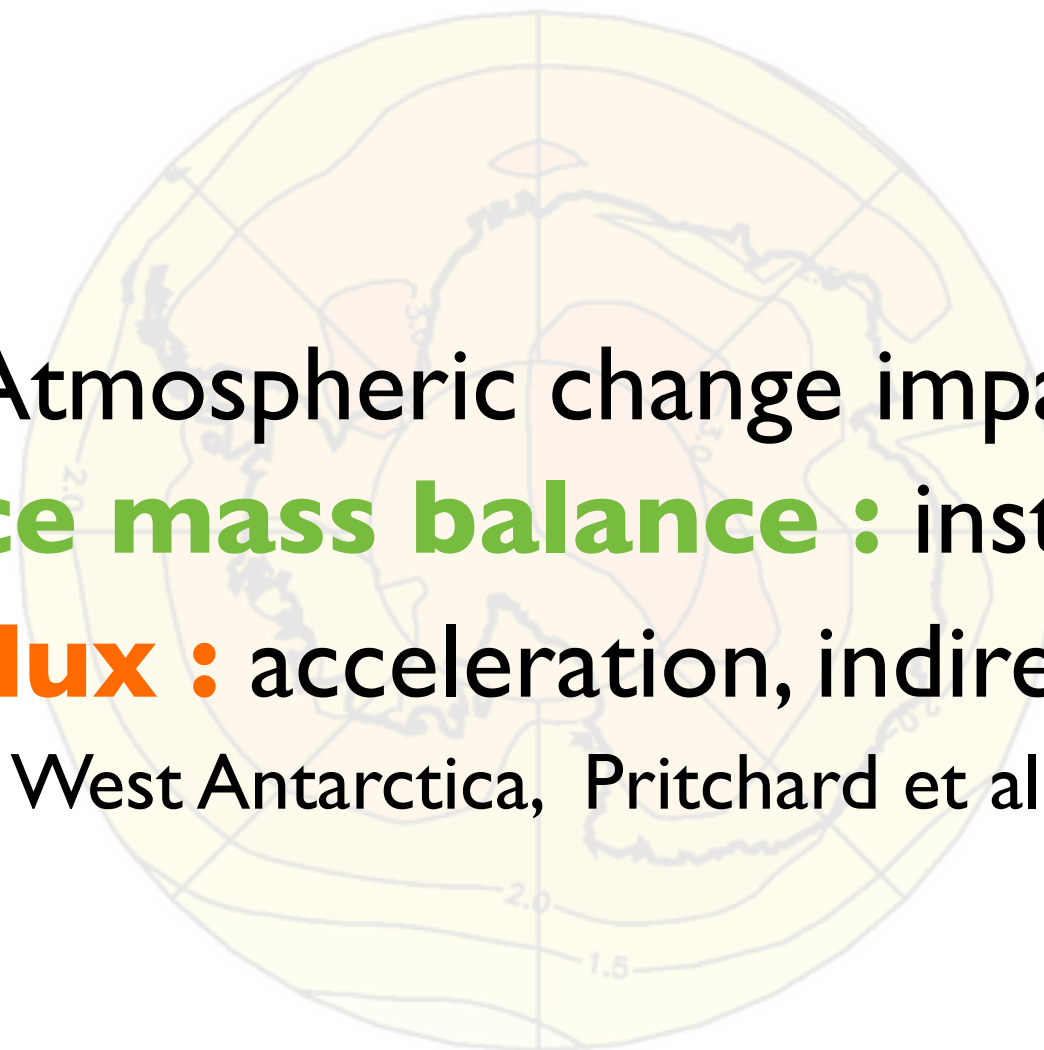
Multi-model mean, IPCC 2007 (A1B scenario)

Atmospheric change impact :

Surface mass balance : instantaneous

Ice flux : acceleration, indirect effect

(in West Antarctica, Pritchard et al. 2012)



1

Modèle

2

Valid.

3

Futur

4

Concl.

5





Thèse de Déborah Verfaillie :

Régionalisation du BMS sur la péninsule Antarctique et Kerguelen
Implantation de l'advection ...

Stratégie d'utilisation de SMHiL :

SMHiL ~ 15km

Meilleur **modèle atmosphérique régional** sur l'Antarctique
(processus polaires)

MAR ? ~ 40km

Meilleur modèle de **climat global** sur l'Antarctique
(circulation présente)

A choisir parmi les modèles de CMIP5 ~ 80km

Régionalisation du BMS pour les modèles d'écoulement

Intermédiaire entre modèle atmosphérique et modèle de calotte

Groenland/Antarctique, siècle/milliers d'années



Thèse de Déborah Verfaillie :

Régionalisation du BMS sur la péninsule Antarctique et Kerguelen
Implantation de l'advection ...

Stratégie d'utilisation de SMHiL :

SMHiL ~ 15km

Meilleur **modèle atmosphérique régional** sur l'Antarctique
(processus polaires)
MAR ? ~ 40km

Meilleur modèle de **climat global** sur l'Antarctique
(circulation présente)

A choisir parmi les modèles de CMIP5 ~ 80km

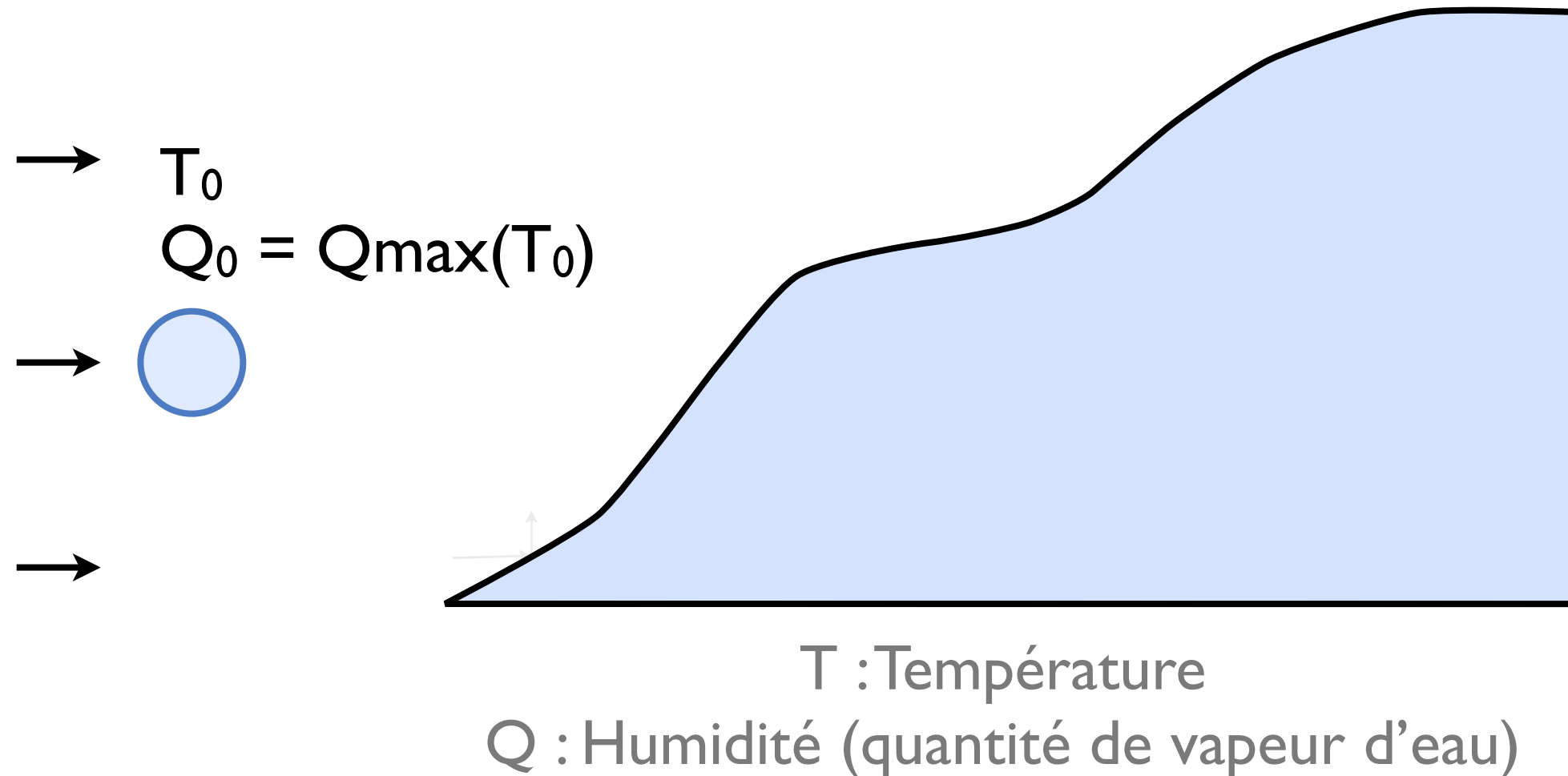
Régionalisation du BMS pour les modèles d'écoulement

Intermédiaire entre modèle atmosphérique et modèle de calotte

Groenland/Antarctique, siècle/milliers d'années

2.2 Régionalisation des précipitations

Elévation de masses d'air à saturation au dessus d'un relief



Enjeu

1

2

Valid.

3

Futur

4

Concl.

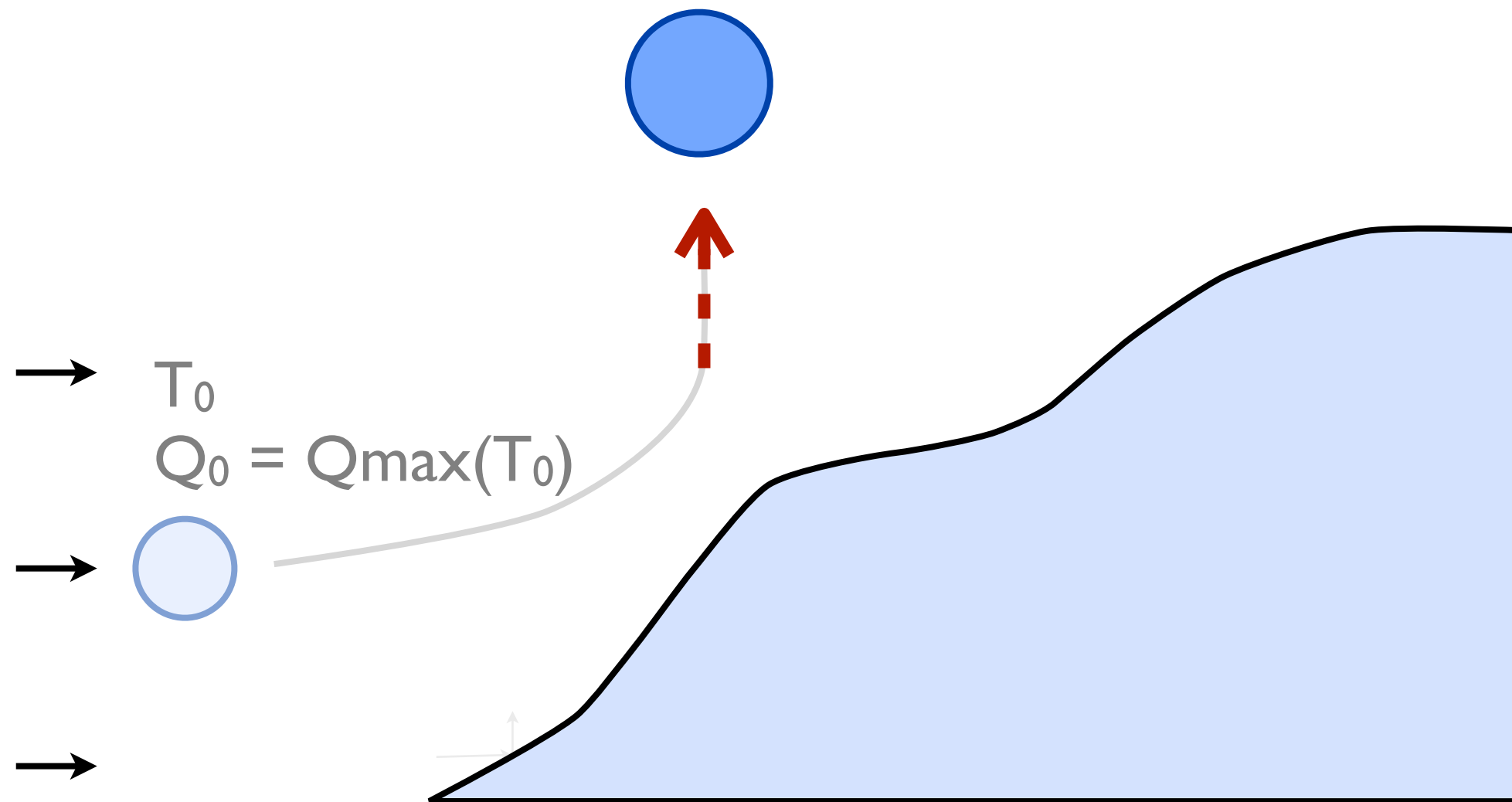
5



2.2 Régionalisation des précipitations

Elévation de masses d'air à saturation au dessus d'un relief

$T_1 < T_0$ Refroidissement adiabatique



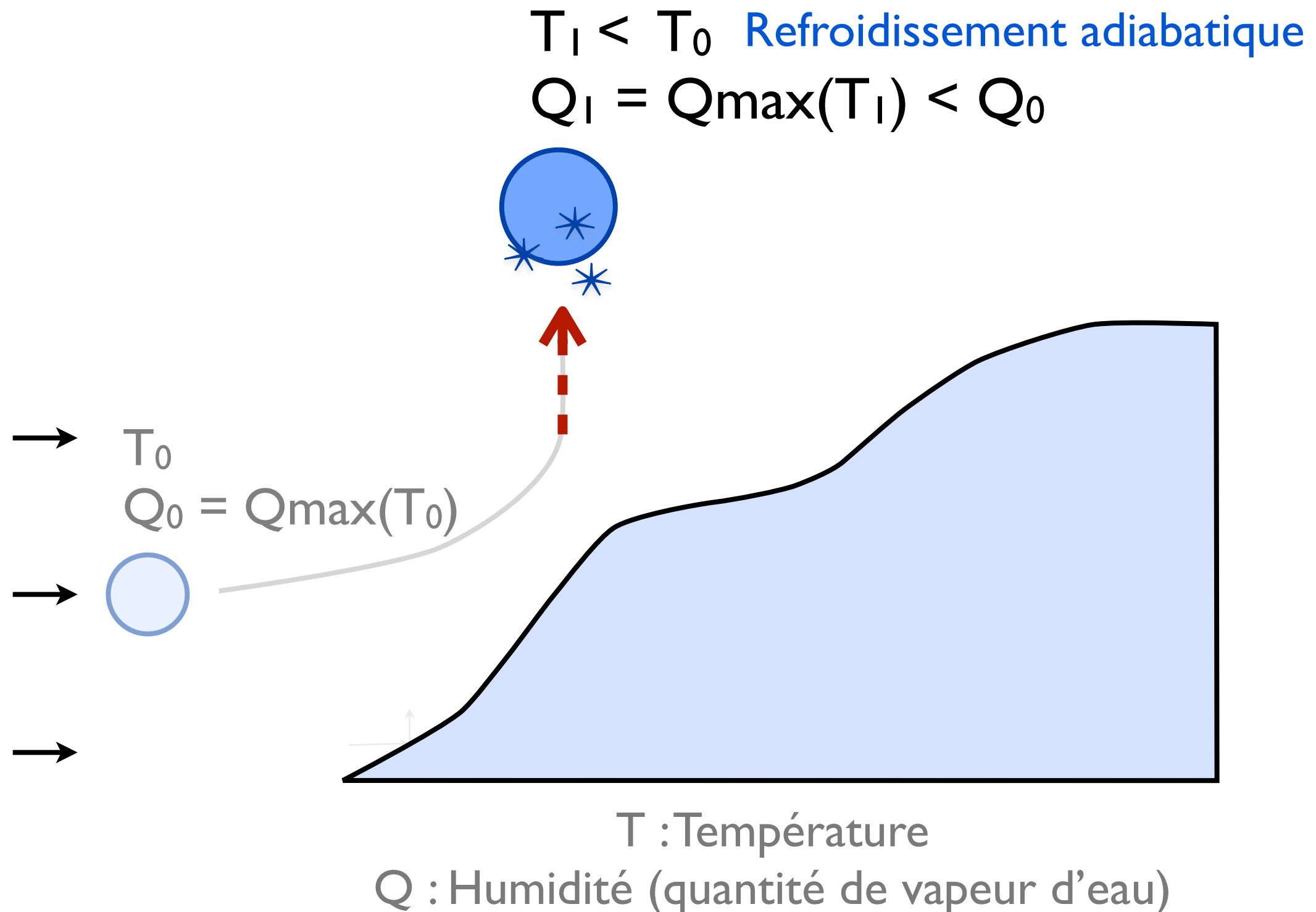
T : Température

Q : Humidité (quantité de vapeur d'eau)



2.2 Régionalisation des précipitations

Elévation de masses d'air à saturation au dessus d'un relief



Enjeu

1

2

Valid.

3

Futur

4

Concl.

5

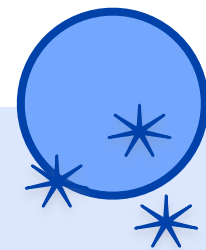


2.2 Régionalisation des précipitations

Elévation de masses d'air à saturation au dessus d'un relief

$T_1 < T_0$ Refroidissement adiabatique

$$Q_1 = Q_{\max}(T_1) < Q_0$$



⇒ **Précipitations orographiques**

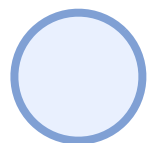
$$\text{Precip. oro.} = \text{Fonction}(T, P, Q) \times \mathbf{w}$$

Intensité proportionnelle
à la **vitesse verticale** du vent

Brasseur, Fettweis, Gallée, Gential

Basé sur Sinclair 1994

→ T_0
 $Q_0 = Q_{\max}(T_0)$



T : Température

Q : Humidité (quantité de vapeur d'eau)

Enjeu

1

2

Valid.

3

Futur

4

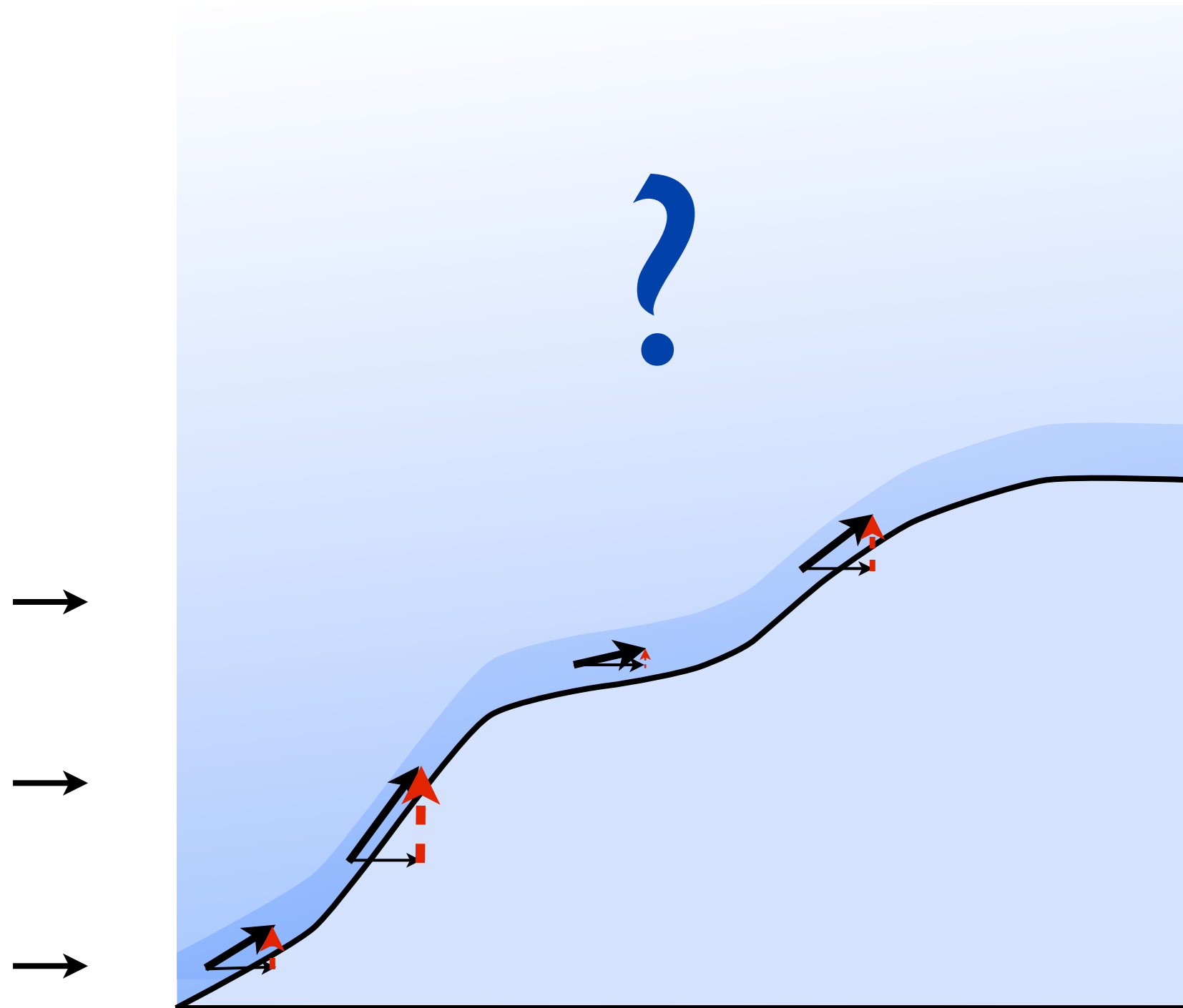
Concl.

5



2.2 Régionalisation des précipitations

En surface : **Vitesse verticale** dépend directement de la **pente** du relief
Au dessus de la surface :



Enjeu

1

2

Valid.

3

Futur

4


Concl.

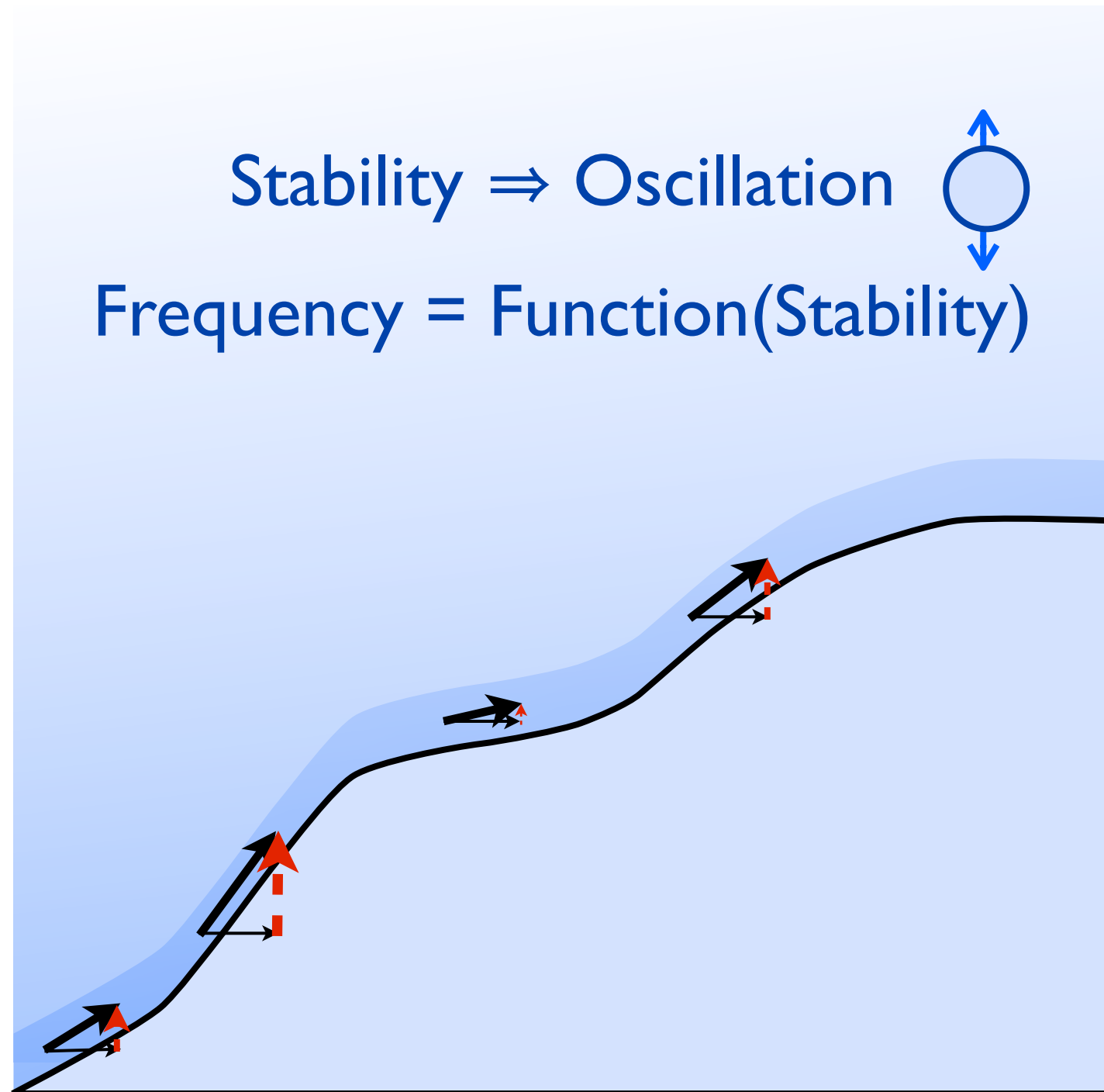
5



2.2 Régionalisation des précipitations

En surface : **Vitesse verticale** dépend directement de la **pente** du relief
Au dessus de la surface :

Stability \Rightarrow Oscillation 
Frequency = Function(Stability)



Enjeu

1

2

Valid.

3

Futur

4

Concl.

5



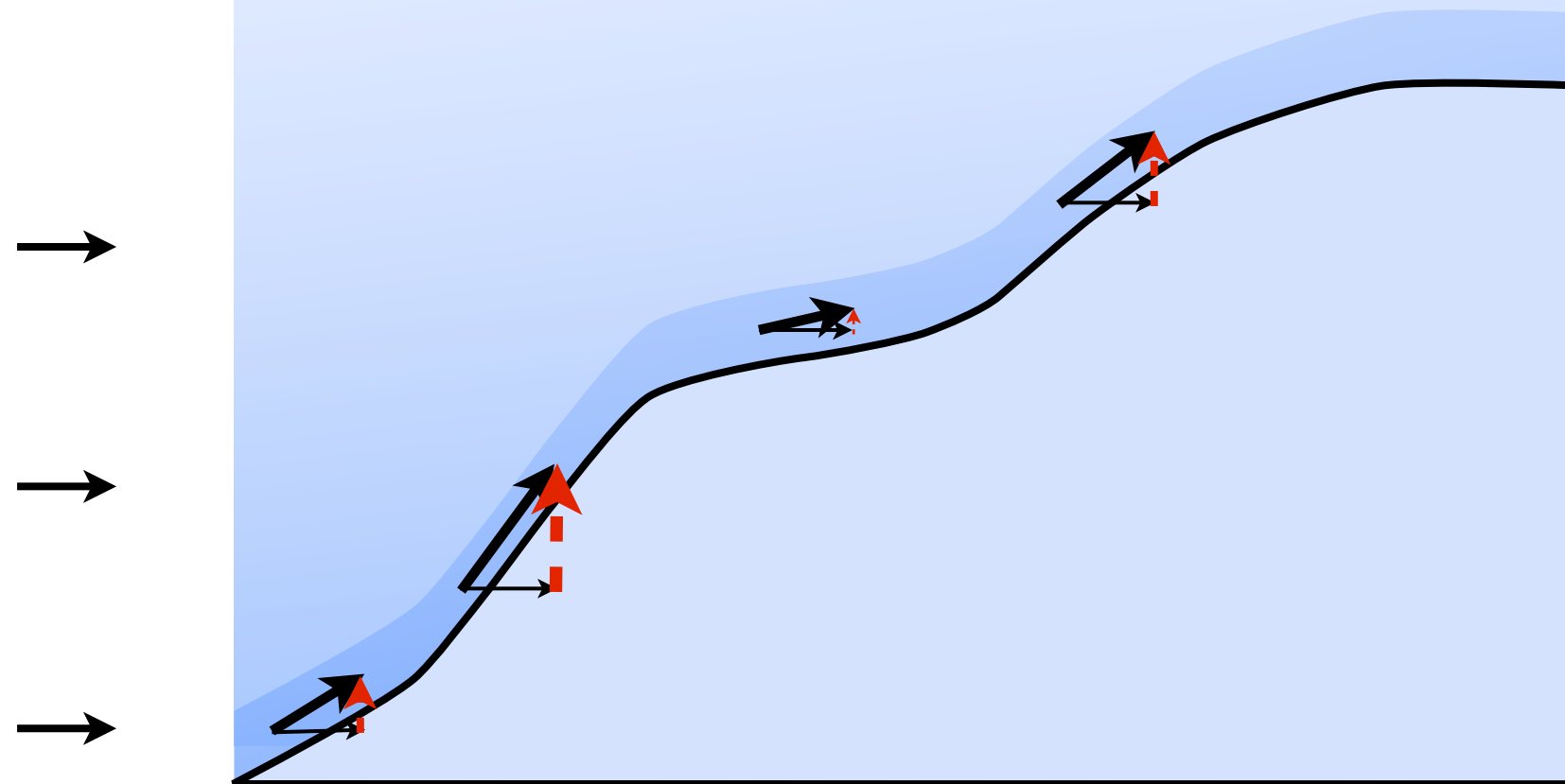
2.2 Régionalisation des précipitations

En surface : **Vitesse verticale** dépend directement de la **pente** du relief
Au dessus de la surface :

Slow-varying stability

Oscillation period \ll time to pass the obstacle

⇒ **Vertically propagating waves**
(hydrostatic internal gravity wave)



Enjeu

1

2

Valid.

3

Futur

4

Concl.

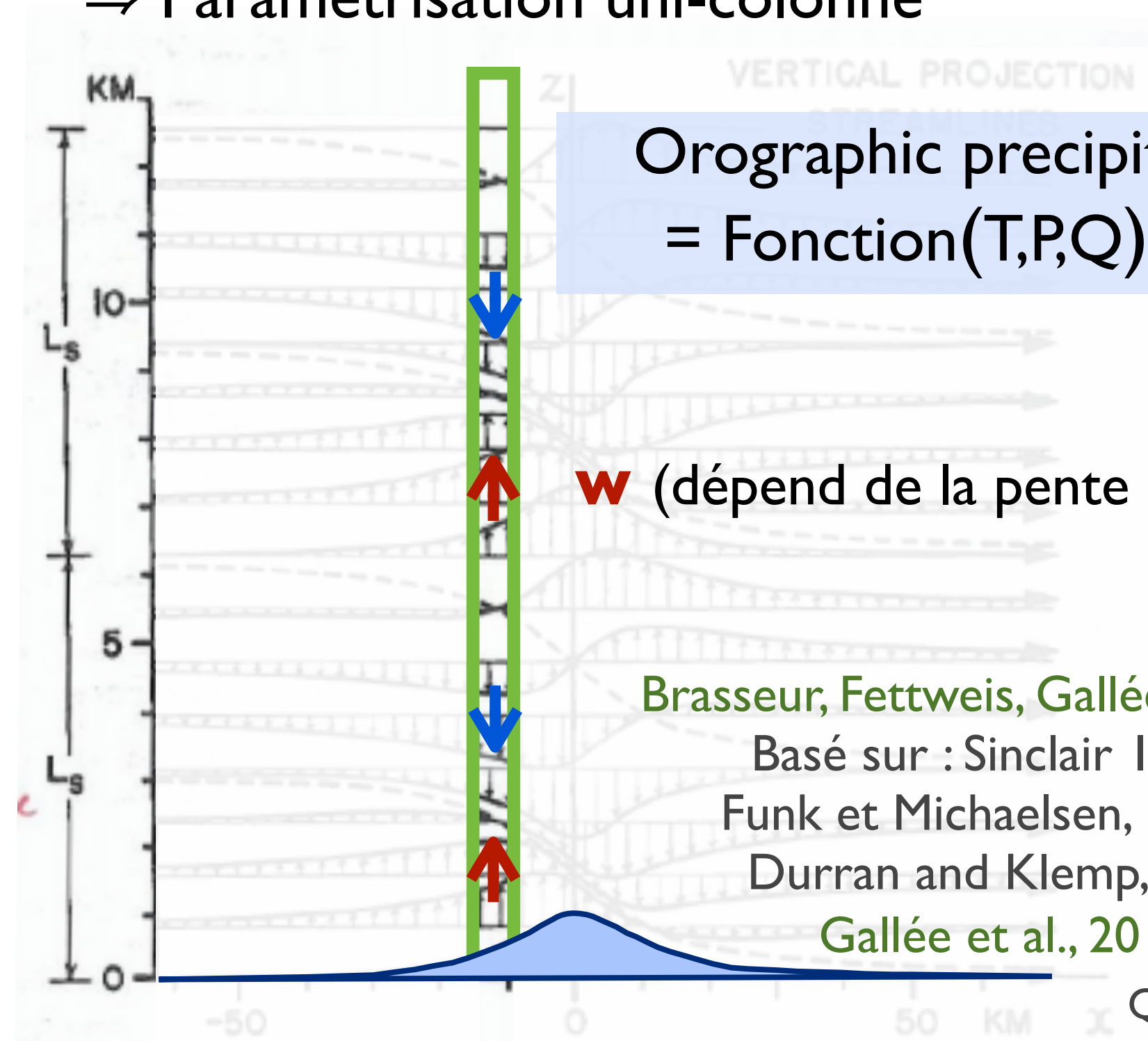
5



2.2 Régionalisation des précipitations

Onde de gravité hydrostatique

⇒ Paramétrisation uni-colonne



Orographic precipitation
= Fonction(T,P,Q) × **w**

w (dépend de la pente du relief)

Brasseur, Fettweis, Gallée, Gential

Basé sur : Sinclair 1994

Funk et Michaelsen, 2004

Durran and Klemp, 1982

Gallée et al., 2011

Queney, 1948

Enjeu

1

2

Valid.

3

Futur

4

Concl.

5



2.2

Precipitation downscaling

Adiabatic cooling \Rightarrow **Orographic precipitation**

$$= \text{Function}(T, P, Q) \times \mathbf{w}$$

\mathbf{w} function of :

Surface slope (topography)

Air stability (gravity waves)

T, P, Q

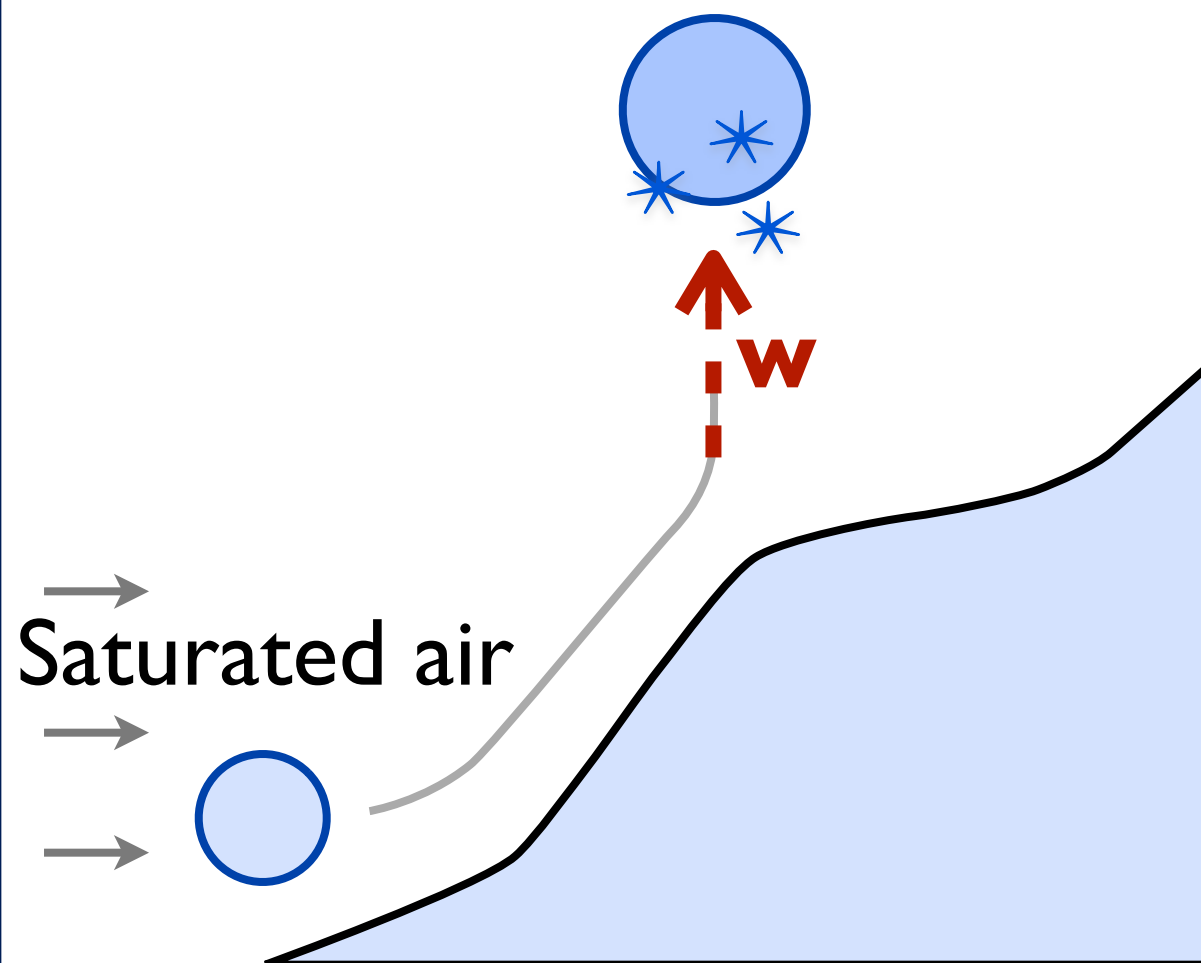
I-D (air column)
parametrization

Brasseur, Fettweis, Gallée, Gentil

Sinclair, 1994

Funk et Michaelsen, 2004

Durran and Klemp, 1982



Enjeu

1

2

Valid.

3

Futur

4

Concl.

5



2.2 Precipitation downscaling

Enjeu

1

2

Valid.

3

Futur

4

Concl.

5



16/07/12

08



2.2 Precipitation downscaling

Enjeu

1

2

Valid.

3

Futur

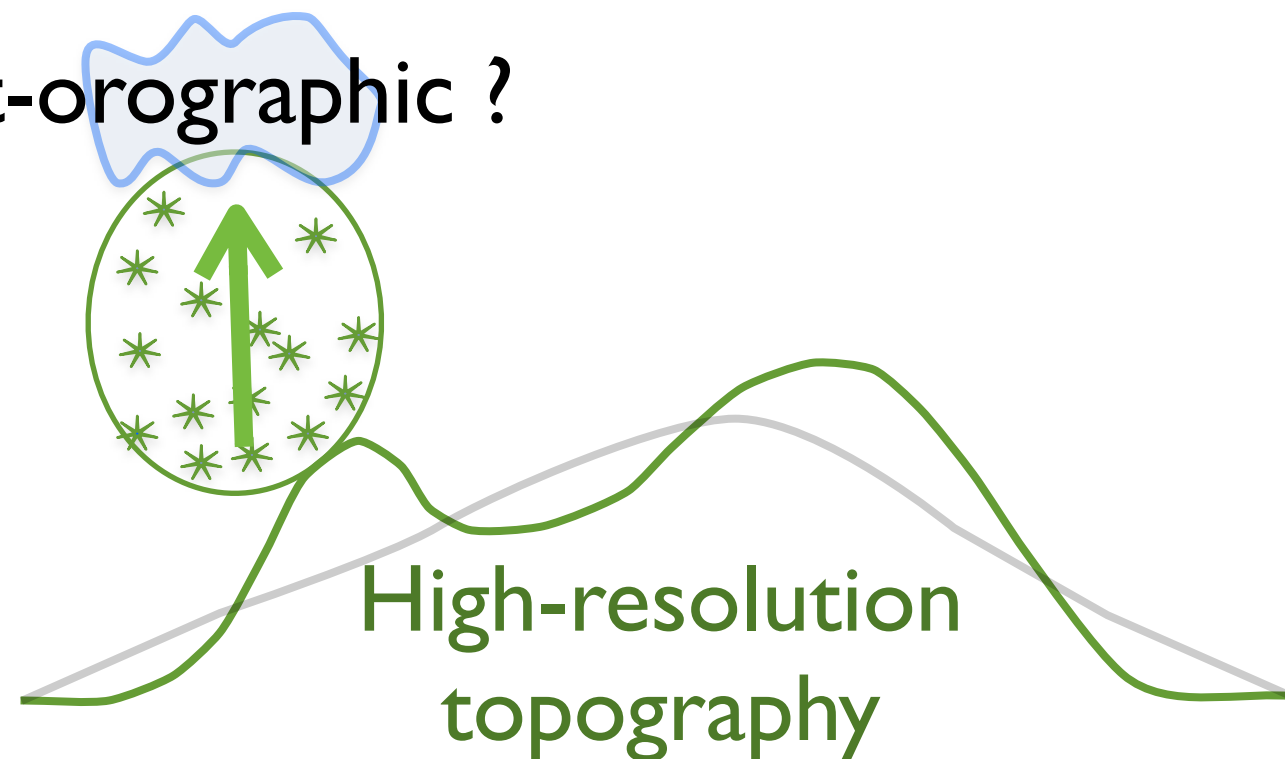
4

Concl.

5



Not-oro-graphic ?



2.2

Precipitation downscaling

Enjeu

1

2

Valid.

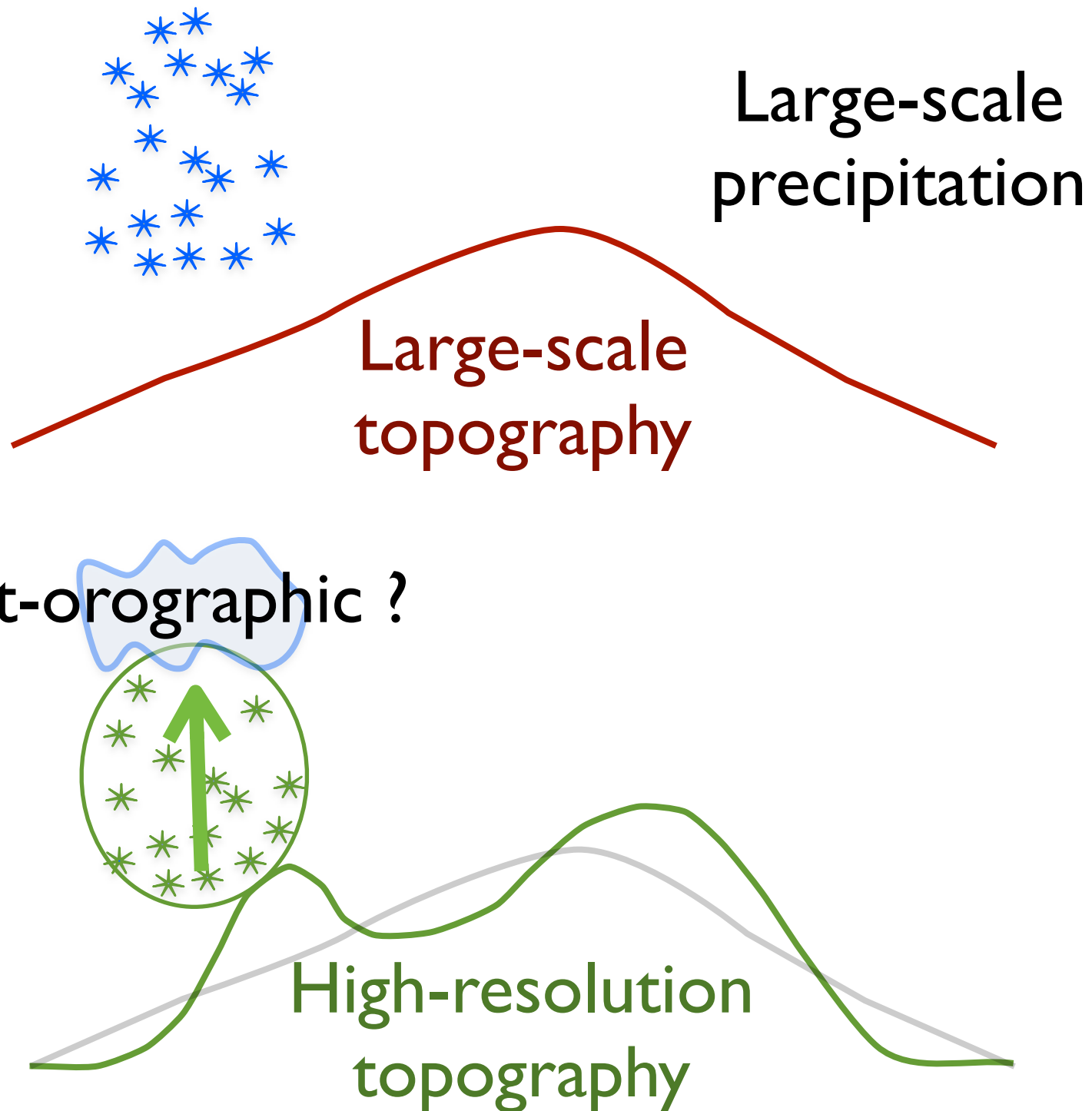
3

Futur

4

Concl.

5



2.2

Precipitation downscaling

Enjeu

1

2

Valid.

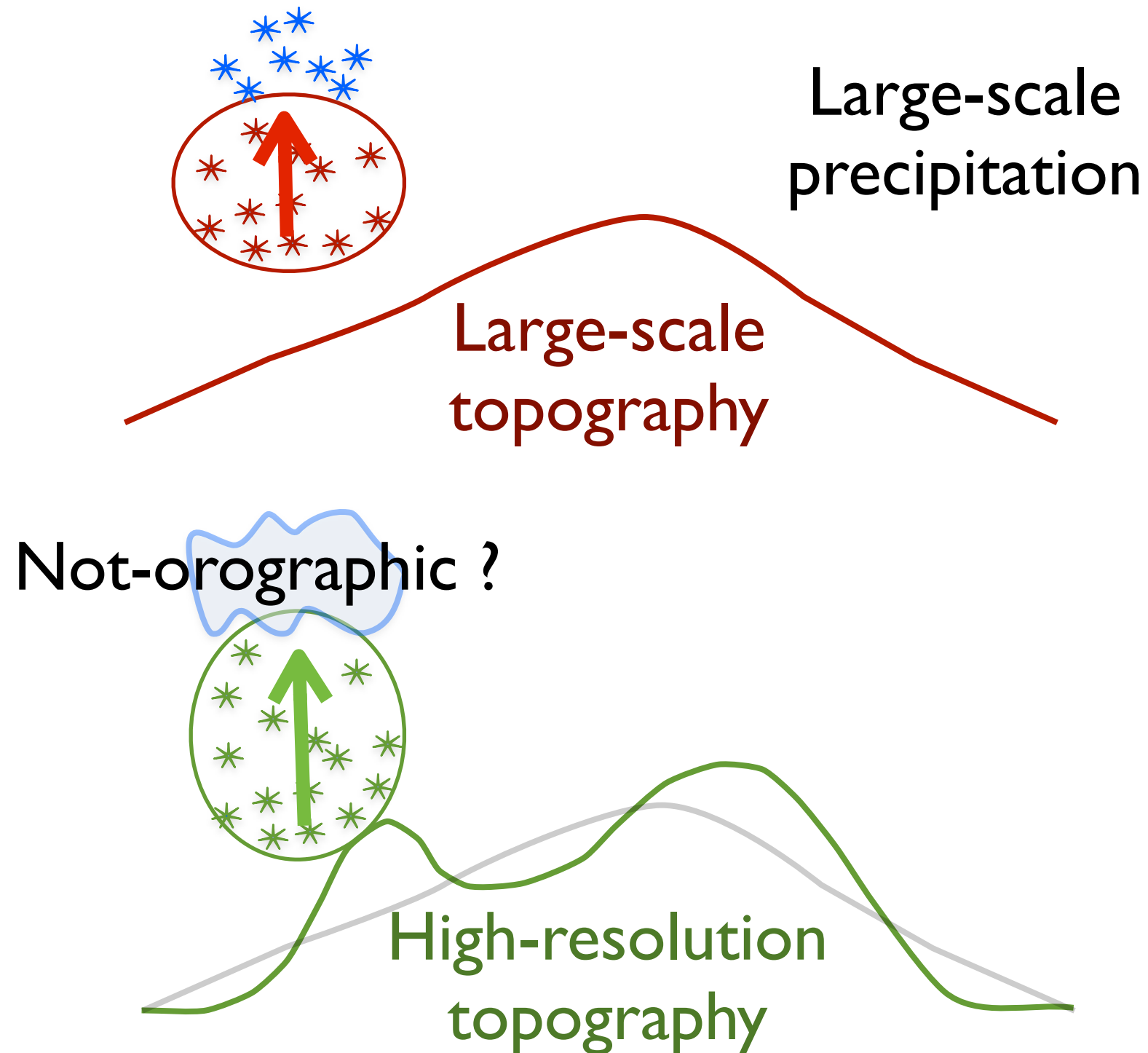
3

Futur

4

Concl.

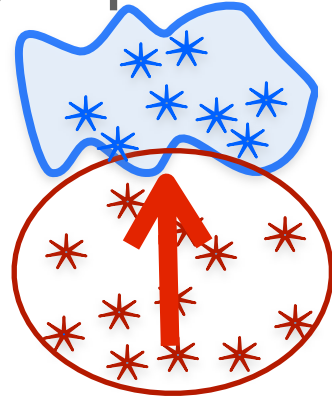
5



2.2

Precipitation downscaling

Not-orographic
(Synoptic scale)



Large-scale
precipitation

Large-scale
topography

Not-orographic ?



High-resolution
topography

Enjeu

1

2

Valid.

3

Futur

4

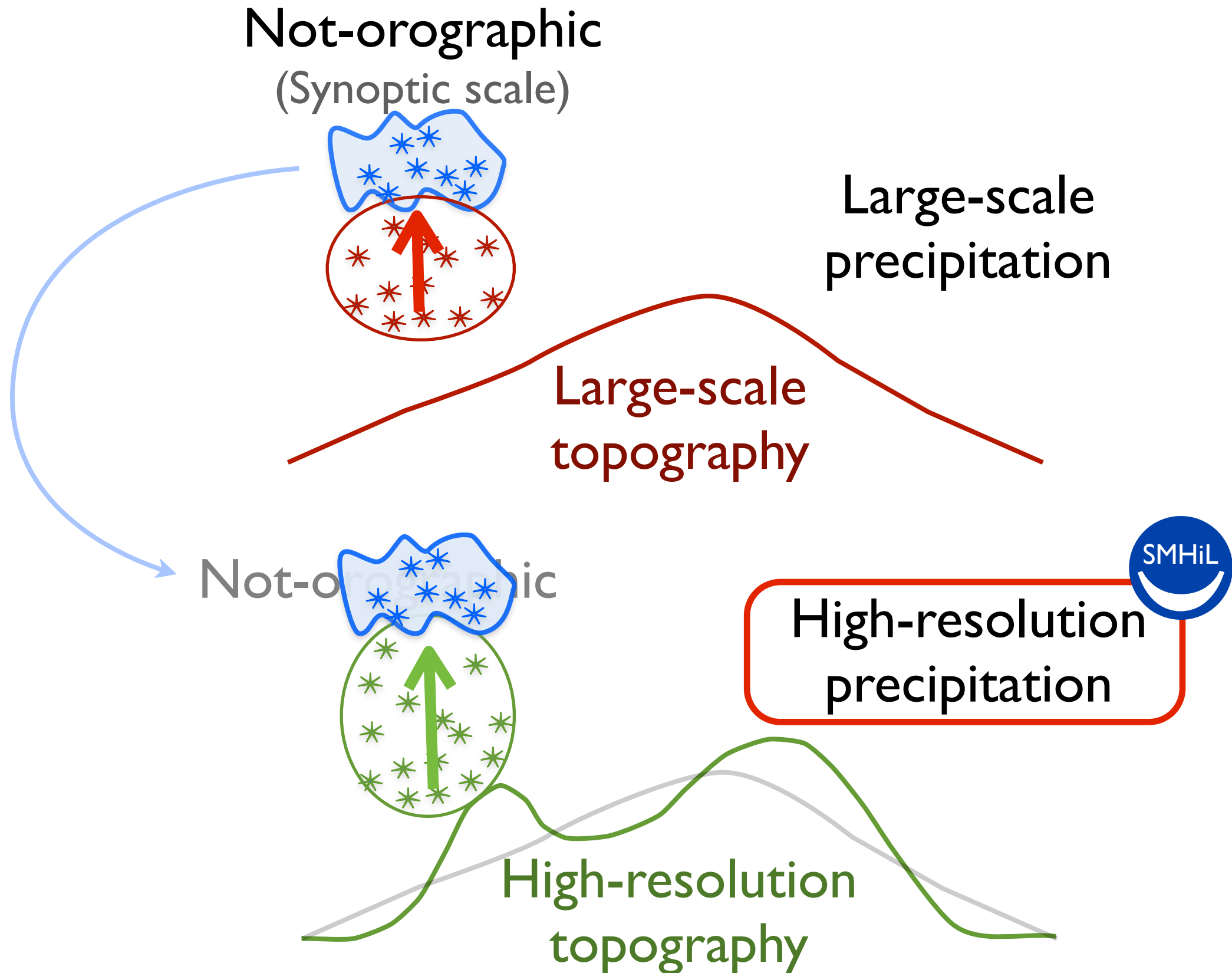
Concl.

5



2.2

Precipitation downscaling



Enjeu

1

2

Valid.

3

Futur

4

Concl.

5



2.4 Forces et faiblesses du modèle

Enjeu

1

2

Valid.

3

Futur

4

Concl.

5



Paramétrisation des **précipitations** adaptée aux **bordures de calotte**

- ▶ Estimation de l'effet orographique
- ▶ Estimation de la part non-orographique
- ▶ Pas d'advection de l'assèchement de l'air

Modélisation du **bilan d'énergie de surface**
avec un schéma pensé pour les **régions enneigées**

- ▶ Estimation de la sublimation/fonte/regel
- ▶ Pas de modélisation de l'érosion/dépôt/transport

Temps de calculs réduits

Paramétrisation uni-dimensionnelle

- ▶ Simulations climatiques à haute résolution

Applicable à **différents modèles de grande échelle**

- ▶ Très dépendant du modèle de grande échelle

2.4 Forces et faiblesses du modèle

Enjeu

1

2

Valid.

3

Futur

4

Concl.

5



Paramétrisation des **précipitations**
adaptée aux **bordures de calotte**

- ▶ Estimation de l'effet orographique
- ▶ Estimation de la part non-orographique
- ▶ Pas d'advection de l'assèchement de l'air

Modélisation du **bilan d'énergie de surface**
avec un schéma pensé pour les **régions enneigées**

- ▶ Estimation de la sublimation/fonte/regel
- ▶ Pas de modélisation de l'érosion/dépôt/transport

Temps de calculs réduits

Paramétrisation uni-dimensionnelle

- ▶ Simulations climatiques à haute résolution

Applicable à **différents modèles de grande échelle**

- ▶ Très dépendant du modèle de grande échelle

2.4 Forces et faiblesses du modèle

Enjeu

1

2

Valid.

3

Futur

4

Concl.

5



Paramétrisation des **précipitations**
adaptée aux **bordures de calotte**

- ▶ Estimation de l'effet orographique
- ▶ Estimation de la part non-orographique
- ▶ Pas d'advection de l'assèchement de l'air

Modélisation du **bilan d'énergie de surface**
avec un schéma pensé pour les **régions enneigées**

- ▶ Estimation de la sublimation/fonte/regel
- ▶ Pas de modélisation de l'érosion/dépôt/transport

Temps de calculs réduits

Paramétrisation uni-dimensionnelle

- ▶ Simulations climatiques à haute résolution

Applicable à **différents modèles de grande échelle**

- ▶ Très dépendant du modèle de grande échelle

2.4 Forces et faiblesses du modèle

Enjeu

1

2

Valid.

3

Futur

4

Concl.

5



Paramétrisation des **précipitations**
adaptée aux **bordures de calotte**

- ▶ Estimation de l'effet orographique
- ▶ Estimation de la part non-orographique
- ▶ Pas d'advection de l'assèchement de l'air

Modélisation du **bilan d'énergie de surface**
avec un schéma pensé pour les **régions enneigées**

- ▶ Estimation de la sublimation/fonte/regel
- ▶ Pas de modélisation de l'érosion/dépôt/transport

Temps de calculs réduits

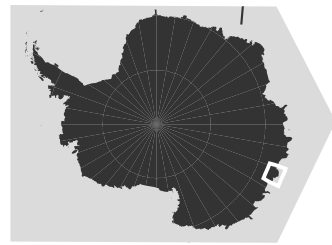
Paramétrisation uni-dimensionnelle

- ▶ Simulations climatiques à haute résolution

Applicable à **différents modèles de grande échelle**

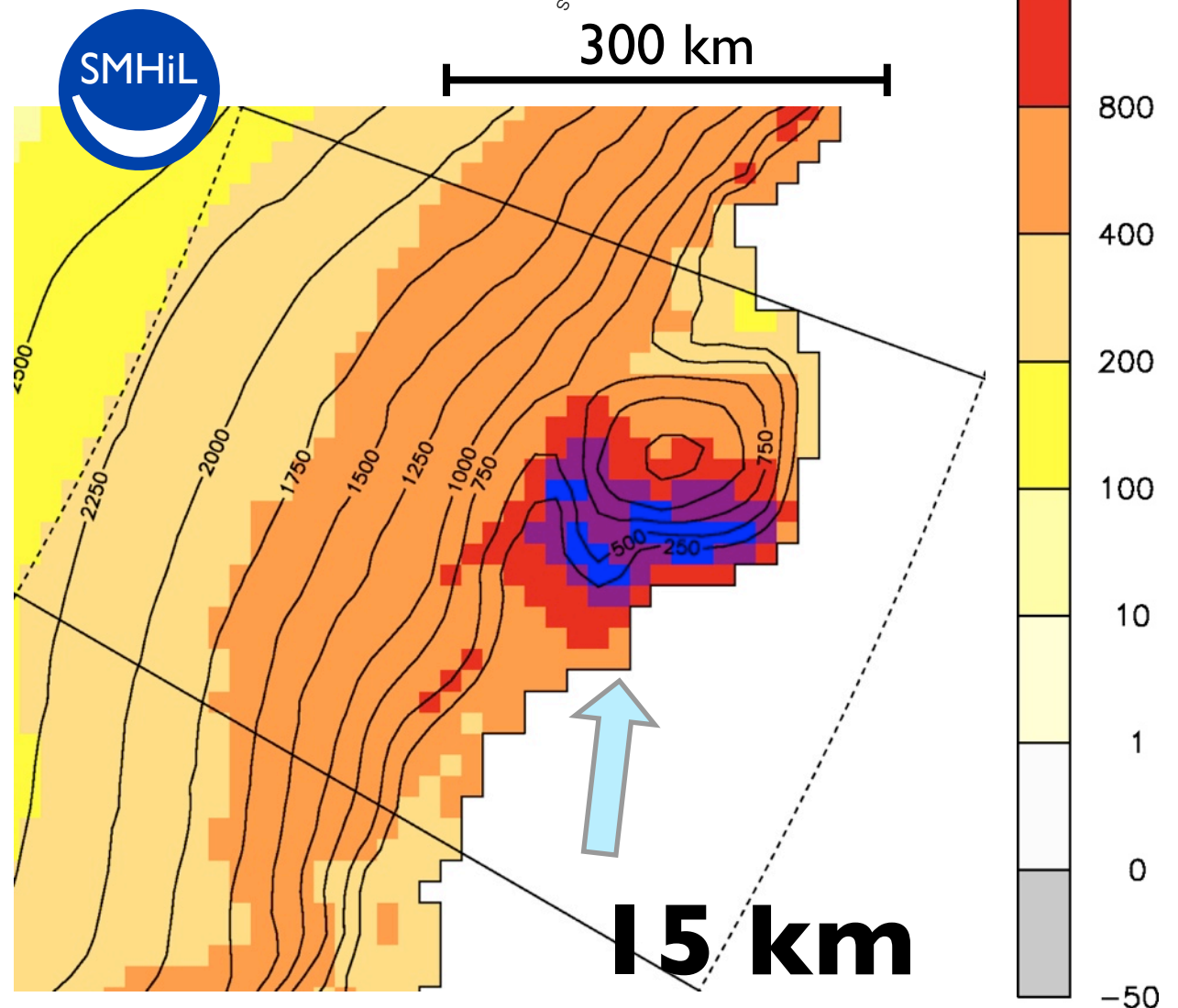
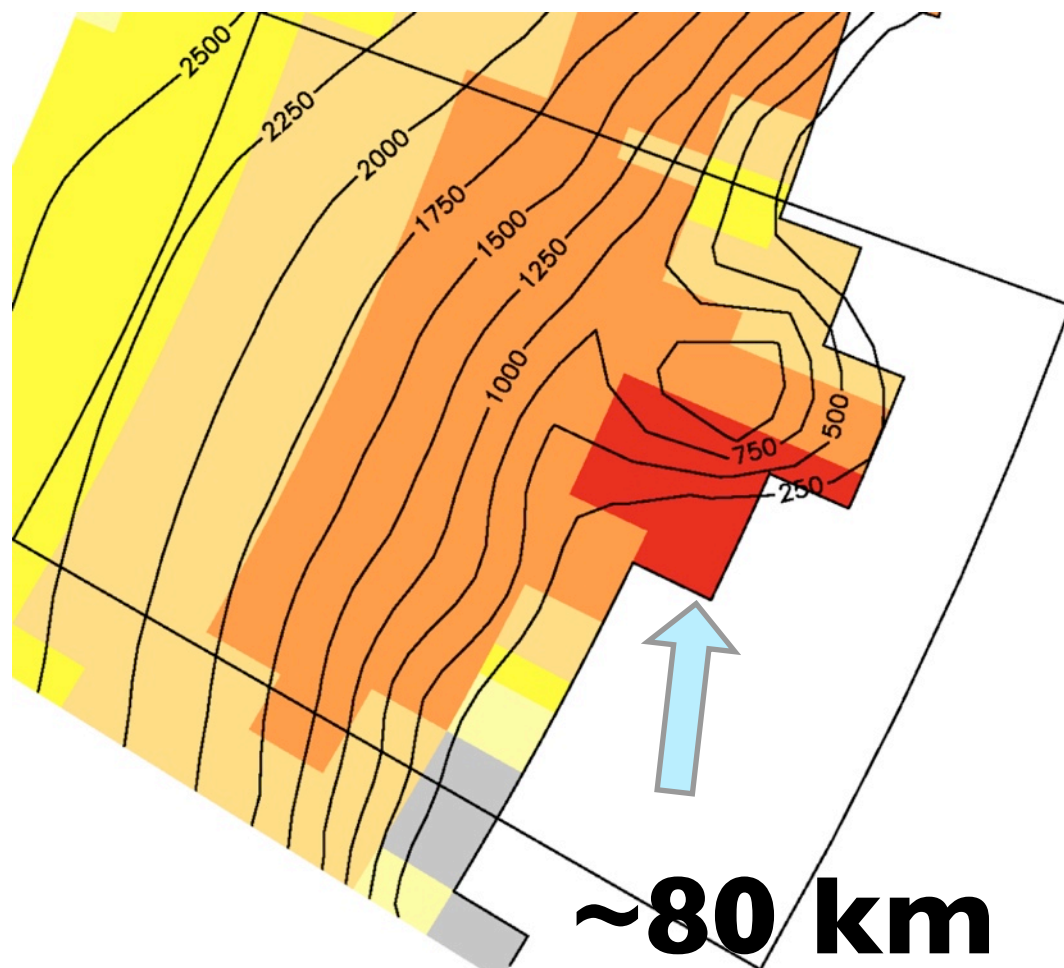
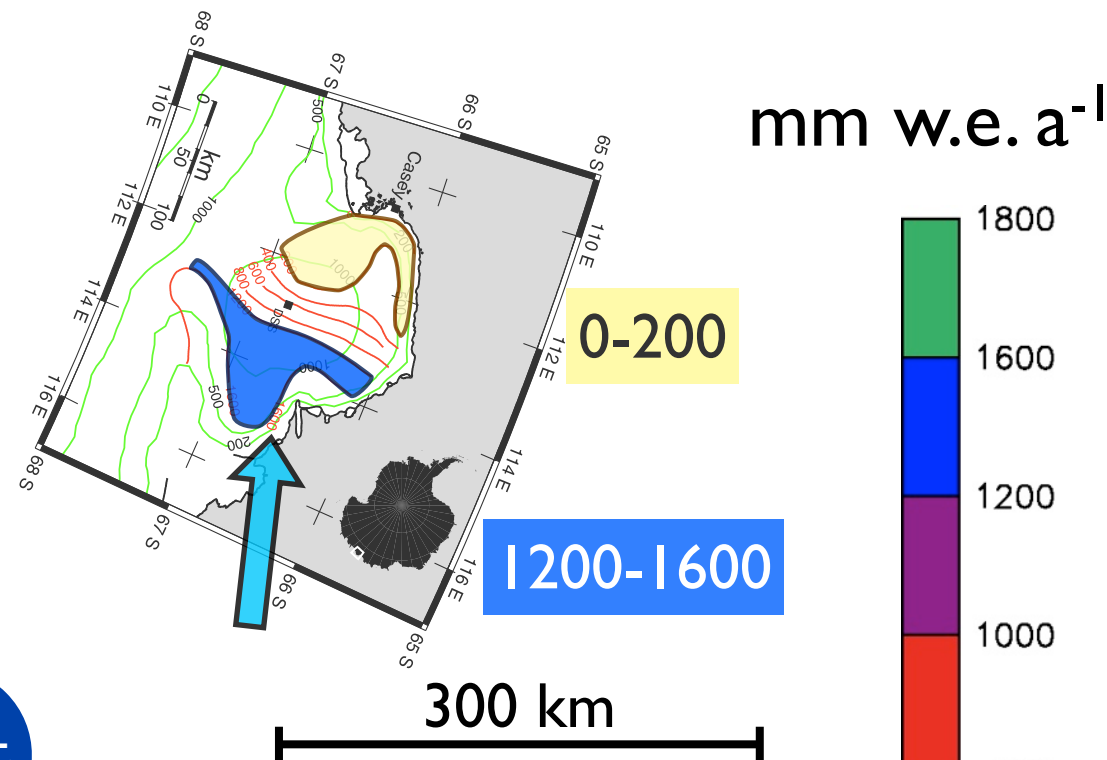
- ▶ Très dépendant du modèle de grande échelle

3.2 Validation sur Law Dome



Law Dome

ERA-Interim, 1989-2010
BMS



Enjeu

1

Modèle

2

3

Futur

4

Concl.

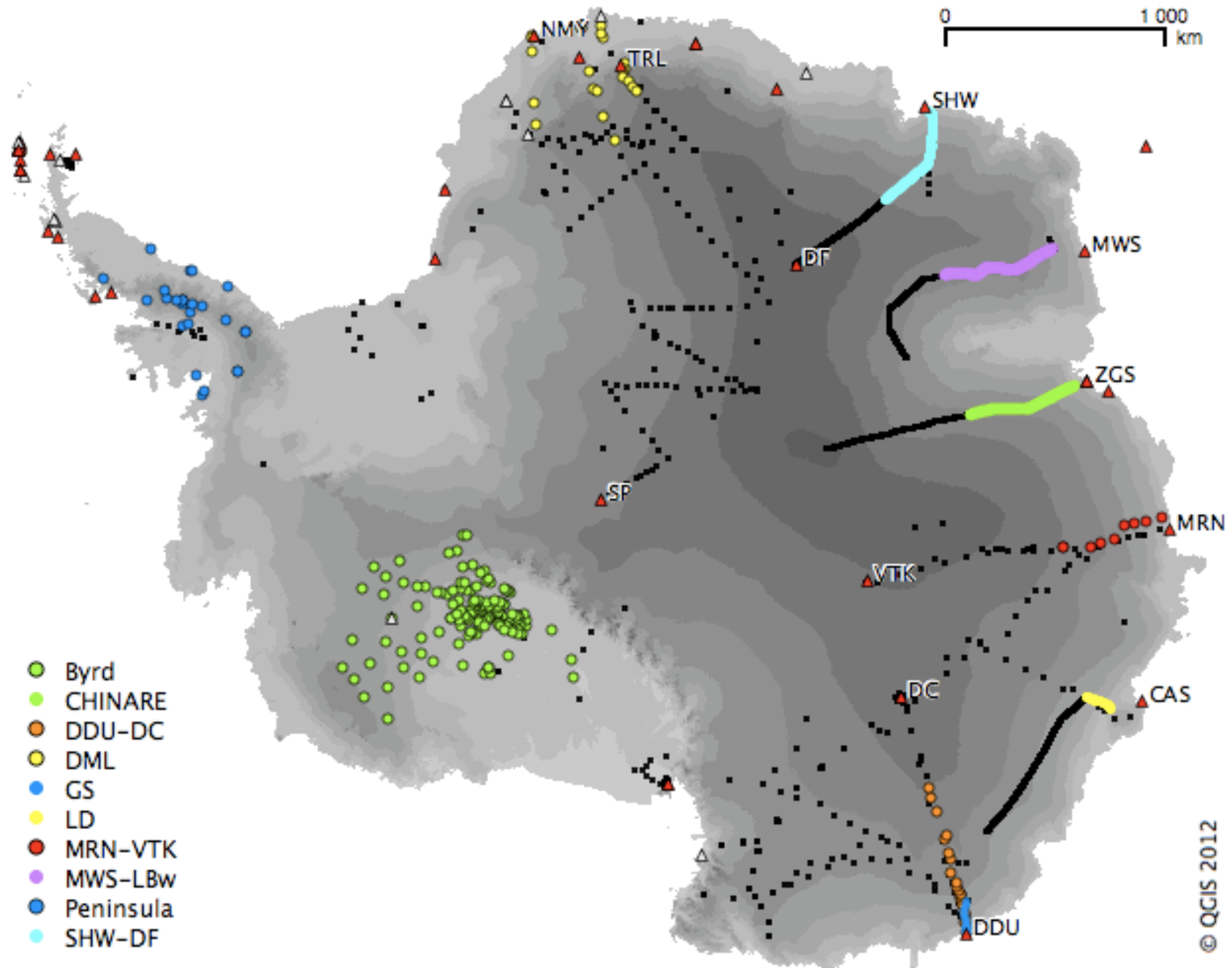
5



16/07/12

32

3.4 Comparaison à des observations

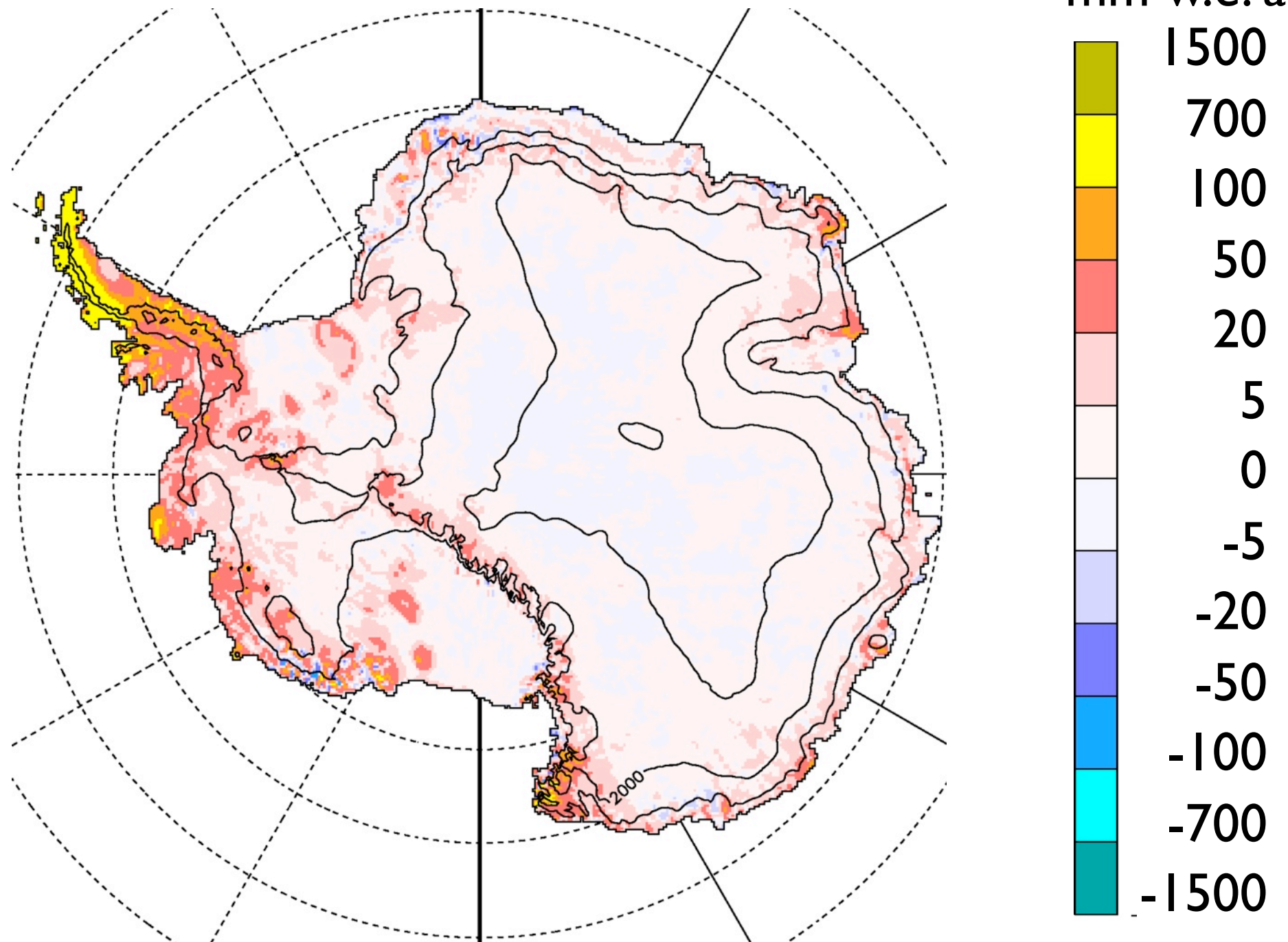


4.2 Evolution du BMS

$\Delta\text{LMDZ4} = 21^{\text{e}} - 20^{\text{e}} \text{ siècle}$ (évolution)

$$\Delta(\Delta\text{Precipitations}) = \Delta\text{SMHiL} - \Delta\text{Grande échelle}$$

mm w.e. a⁻¹

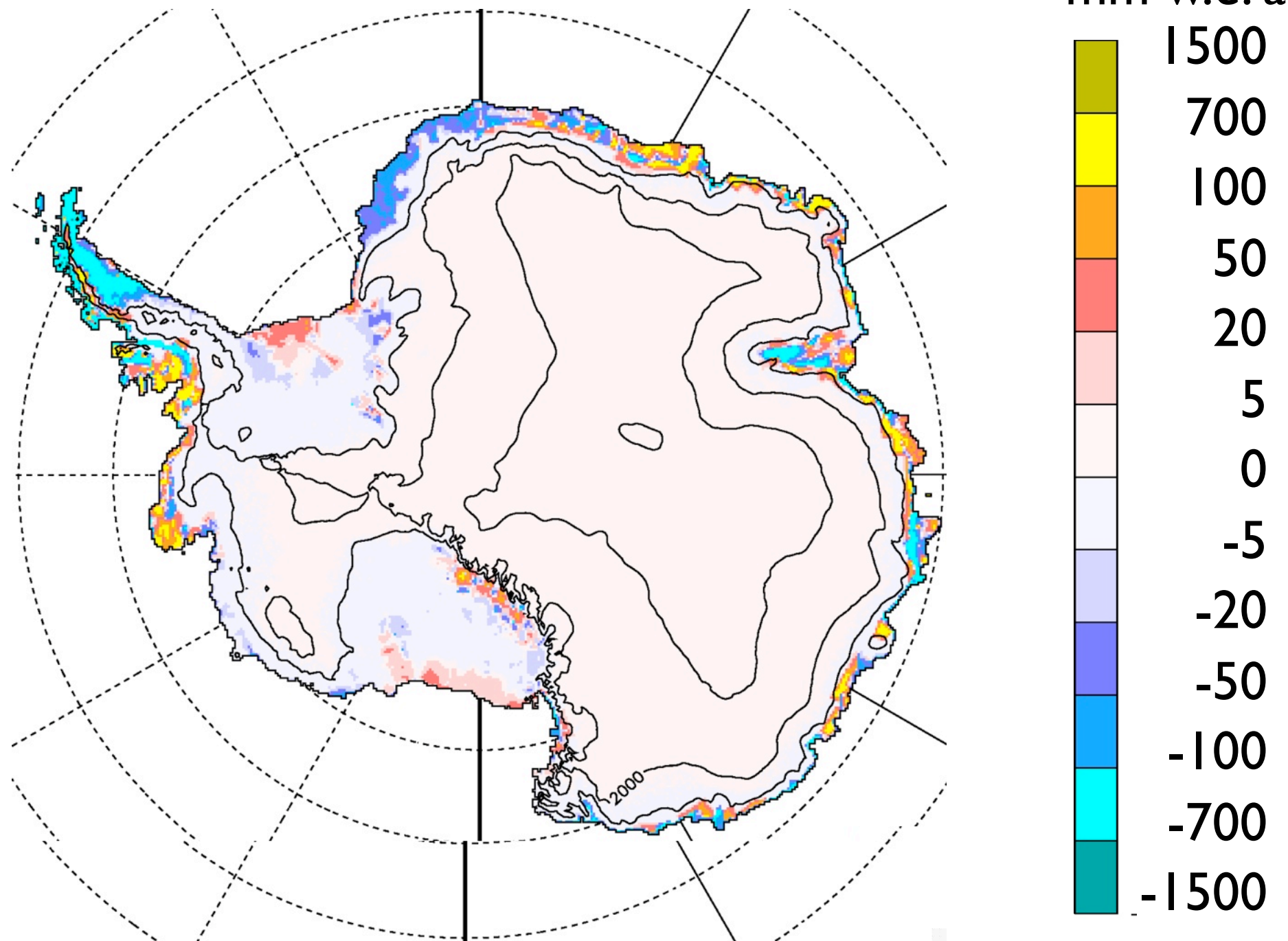


4.2 Evolution du BMS

$\Delta\text{LMDZ4} = 21^{\text{e}} - 20^{\text{e}} \text{ siècle}$ (évolution)

$$\Delta(\Delta\text{Ruissellement}) = \Delta\text{SMHiL} - \Delta\text{Grande échelle}$$

mm w.e. a⁻¹

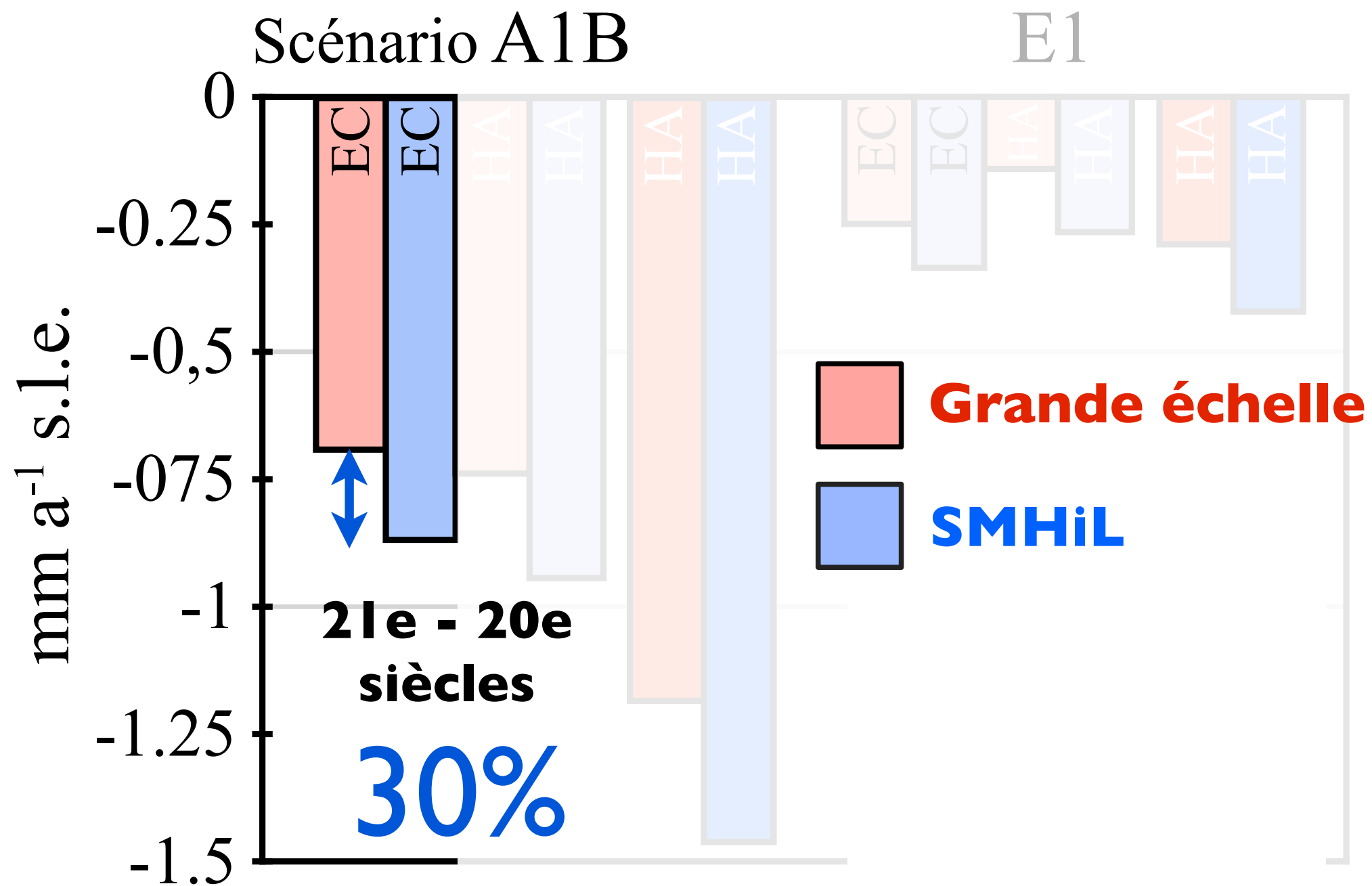


4.3

Contribution du BMS aux variations du niveau des mers

LMDZ4

Forçage océanique : **EC** = ECHAM5 **HA** = HADCM3

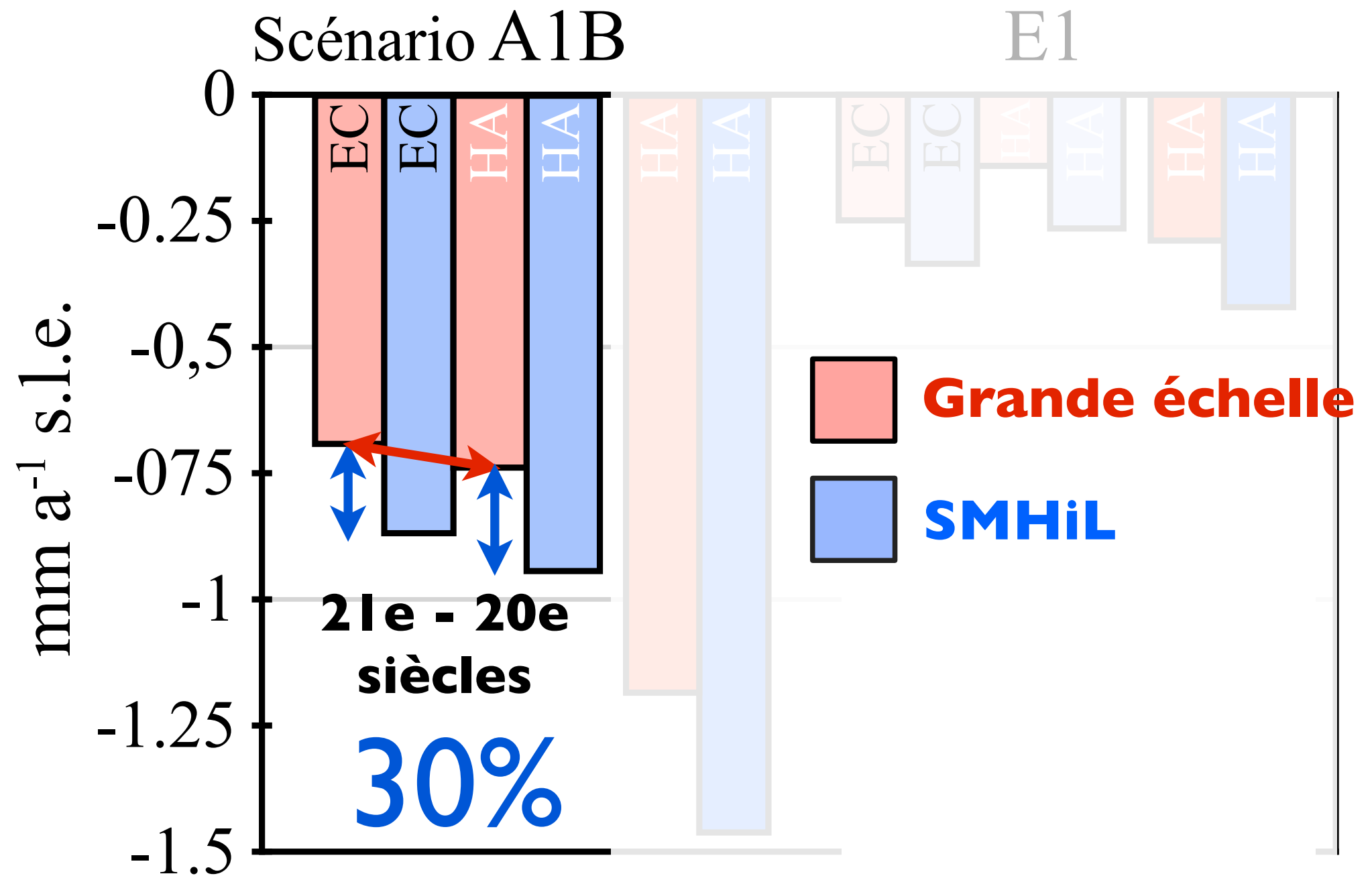


4.3

Contribution du BMS aux variations du niveau des mers

LMDZ4

Forçage océanique : **EC** = ECHAM5 **HA** = HADCM3

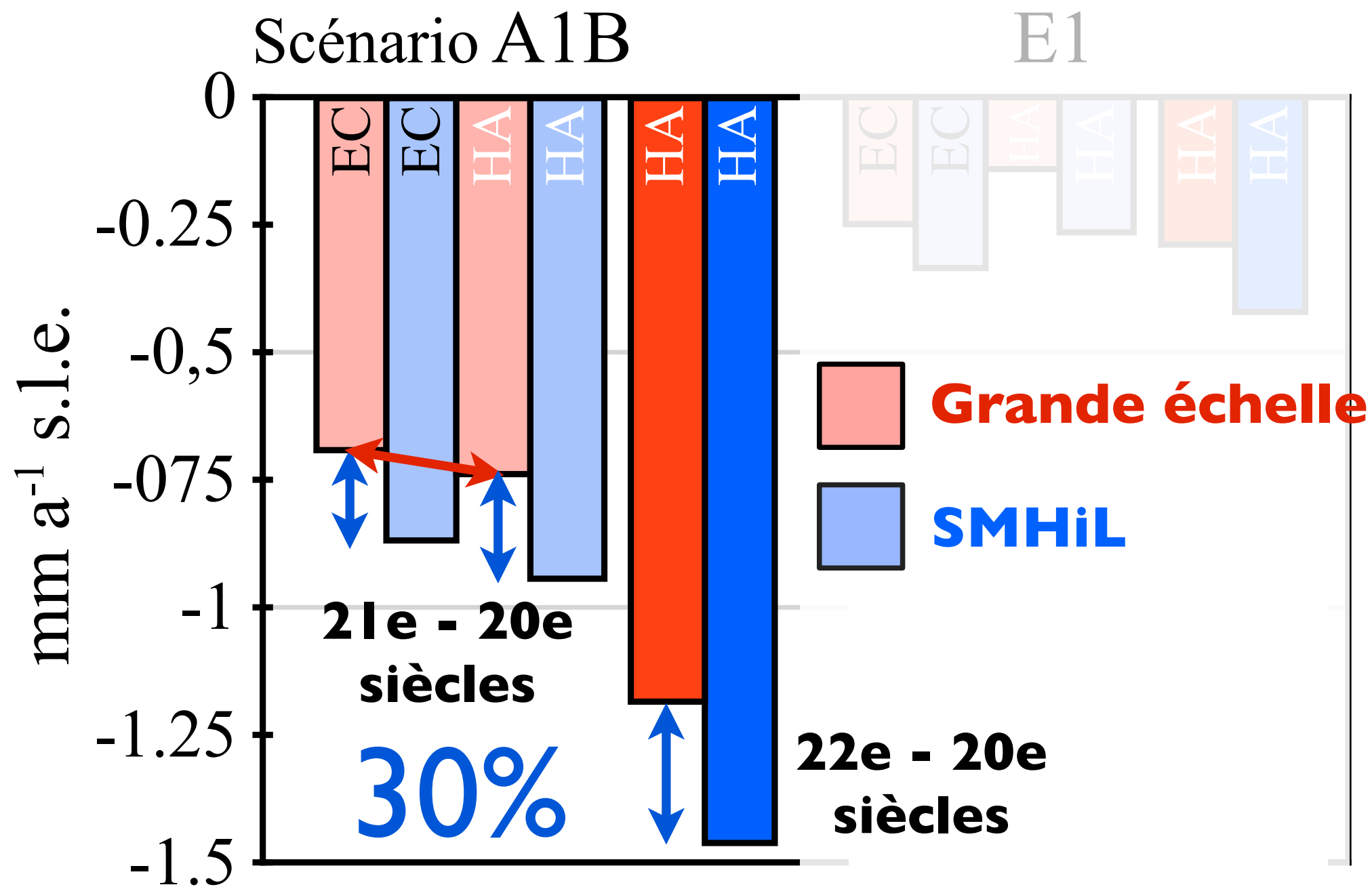


4.3

Contribution du BMS aux variations du niveau des mers

LMDZ4

Forçage océanique : **EC** = ECHAM5 **HA** = HADCM3



2.2 Régionalisation des précipitations

Equations d'écoulement, fluide Newtonien

Conservation de la quantité de mouvement

Conservation de la masse

Conservation de l'énergie

Hypothèses simplificatrices :

Transformation adiabatique

Gaz parfait

Écoulement irrotationnel

Approximation de Boussinesq

Écoulement stationnaire

2D

Linéarisation des équations :

Petites perturbations autour de l'équilibre hydrostatique

Vent horizontal \gg Vent vertical

Variables moyennes variant peu horizontalement

\Rightarrow Equation d'onde sur la vitesse verticale du vent

Stabilité de l'atmosphère et critères géométriques :

Stabilité variant lentement selon la verticale

Période d'oscillation \ll Temps pour passer l'obstacle

\Rightarrow Onde de gravité hydrostatique



2.2 Régionalisation des précipitations

Equations d'écoulement, fluide Newtonien

Conservation de la quantité de mouvement

Conservation de la masse

Conservation de l'énergie

Hypothèses simplificatrices :

Transformation adiabatique

Gaz parfait

Ecoulement irrotationnel

Approximation de Boussinesq

Ecoulement stationnaire

2D

Linéarisation des équations :

Petites perturbations autour de l'équilibre hydrostatique

Vent horizontal \gg Vent vertical

Variables moyennes variant peu horizontalement

\Rightarrow Equation d'onde sur la vitesse verticale du vent

Stabilité de l'atmosphère et critères géométriques :

Stabilité variant lentement selon la verticale

Période d'oscillation \ll Temps pour passer l'obstacle

\Rightarrow Onde de gravité hydrostatique



2.2 Régionalisation des précipitations

Equations d'écoulement, fluide Newtonien

Conservation de la quantité de mouvement

Conservation de la masse

Conservation de l'énergie

Hypothèses simplificatrices :

Gaz parfait

Transformation adiabatique

Écoulement irrotationnel

Approximation de Boussinesq

Écoulement stationnaire

2D

Linéarisation des équations :

Petites perturbations autour de l'équilibre hydrostatique

Vent horizontal \gg Vent vertical

Variables moyennes variant peu horizontalement



2.2 Régionalisation des précipitations

Equations d'écoulement, fluide Newtonien

Conservation de la quantité de mouvement

Conservation de la masse

Conservation de l'énergie

Hypothèses simplificatrices :

Transformation adiabatique

Gaz parfait

Ecoulement irrotationnel

Approximation de Boussinesq

Ecoulement stationnaire

2D

Linéarisation des équations :

Petites perturbations autour de l'équilibre hydrostatique

Vent horizontal \gg Vent vertical

Variables moyennes variant peu horizontalement

\Rightarrow Equation d'onde sur la vitesse verticale du vent ...



2.2 Régionalisation des précipitations

Equations d'écoulement, fluide Newtonien

Conservation de la quantité de mouvement

Conservation de la masse

Conservation de l'énergie

Hypothèses simplificatrices :

Transformation adiabatique

Gaz parfait

Ecoulement irrotationnel

Approximation de Boussinesq

Ecoulement stationnaire

2D

Linéarisation des équations :

Petites perturbations autour de l'équilibre hydrostatique

Vent horizontal \gg Vent vertical

Variables moyennes variant peu horizontalement

\Rightarrow Equation d'onde sur la vitesse verticale du vent ...

Stabilité de l'atmosphère et critères géométriques :

Stabilité variant lentement selon la verticale

Période d'oscillation \ll Temps pour passer l'obstacle



2.2 Régionalisation des précipitations

Equations d'écoulement, fluide Newtonien

Conservation de la quantité de mouvement

Conservation de la masse

Conservation de l'énergie

Hypothèses simplificatrices :

Transformation adiabatique

Gaz parfait

Ecoulement irrotationnel

Approximation de Boussinesq

Ecoulement stationnaire

2D

Linéarisation des équations :

Petites perturbations autour de l'équilibre hydrostatique

Vent horizontal \gg Vent vertical

Variables moyennes variant peu horizontalement

\Rightarrow Equation d'onde sur la vitesse verticale du vent ...

Stabilité de l'atmosphère et critères géométriques :

Stabilité variant lentement selon la verticale

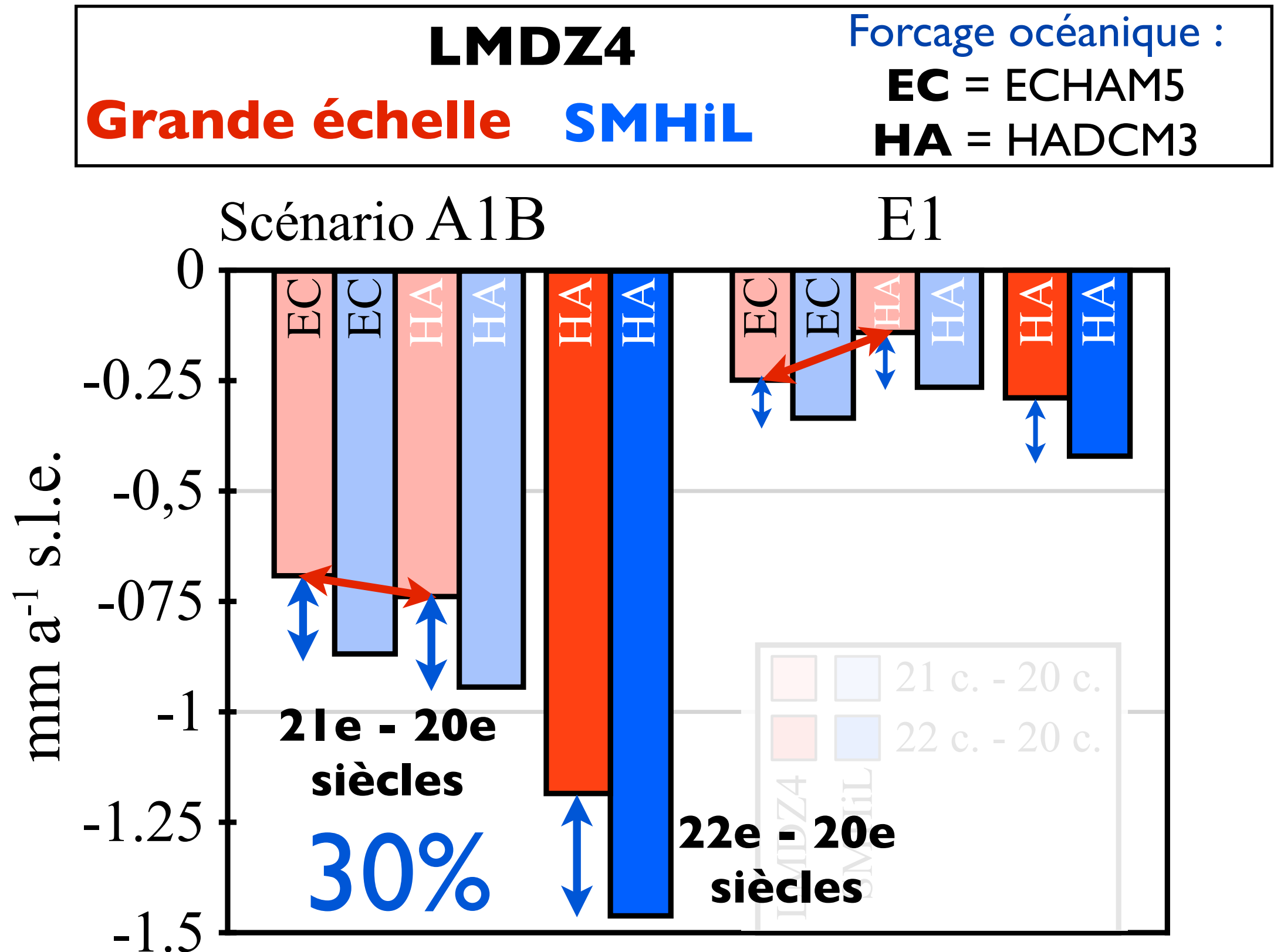
Période d'oscillation \ll Temps pour passer l'obstacle

... dépendant des conditions locales de topographie



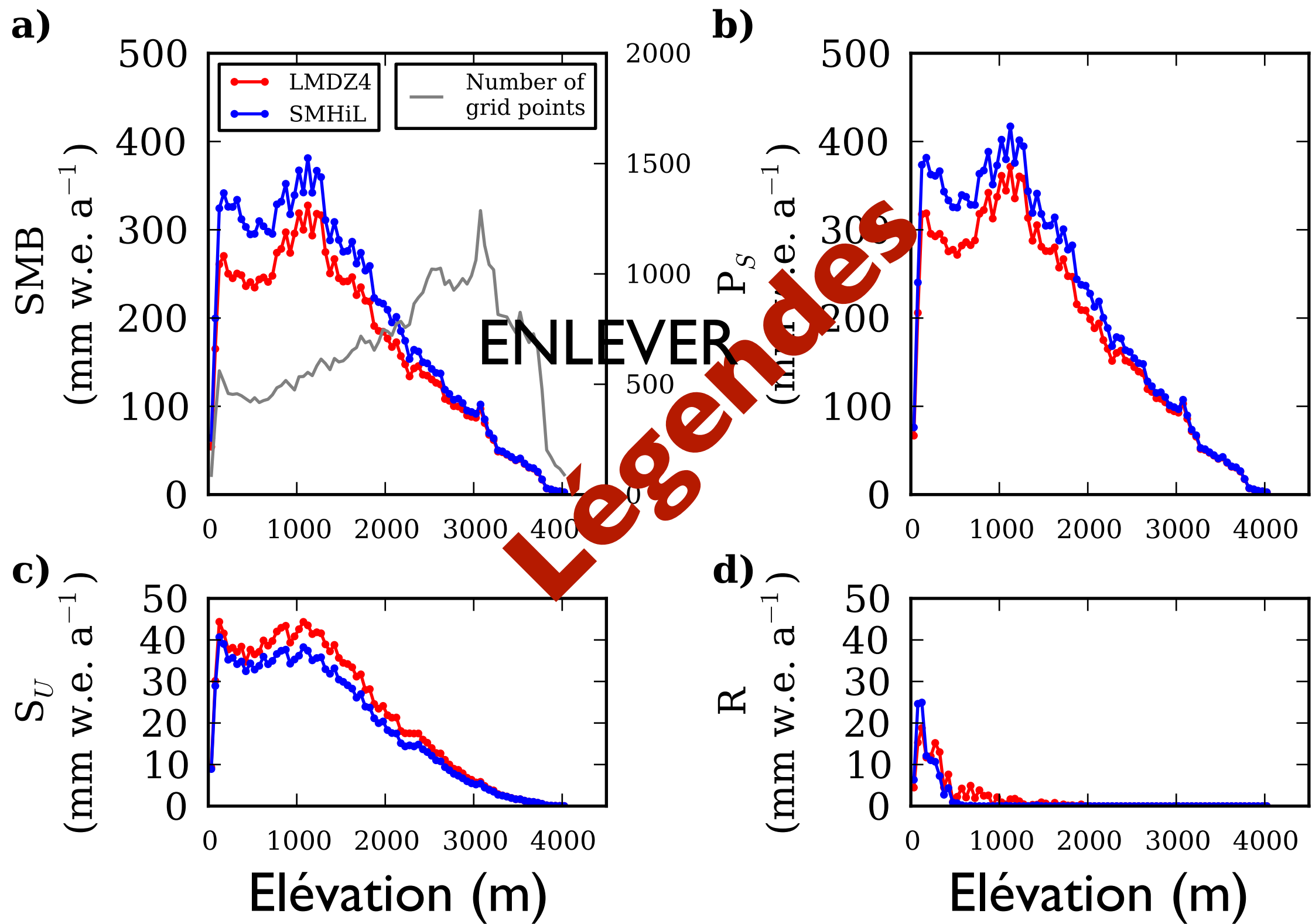
4.1

Augmentation du BMS au cours des prochains siècles



3.2 Apport de la régionalisation

LMDZ4 1981-2000

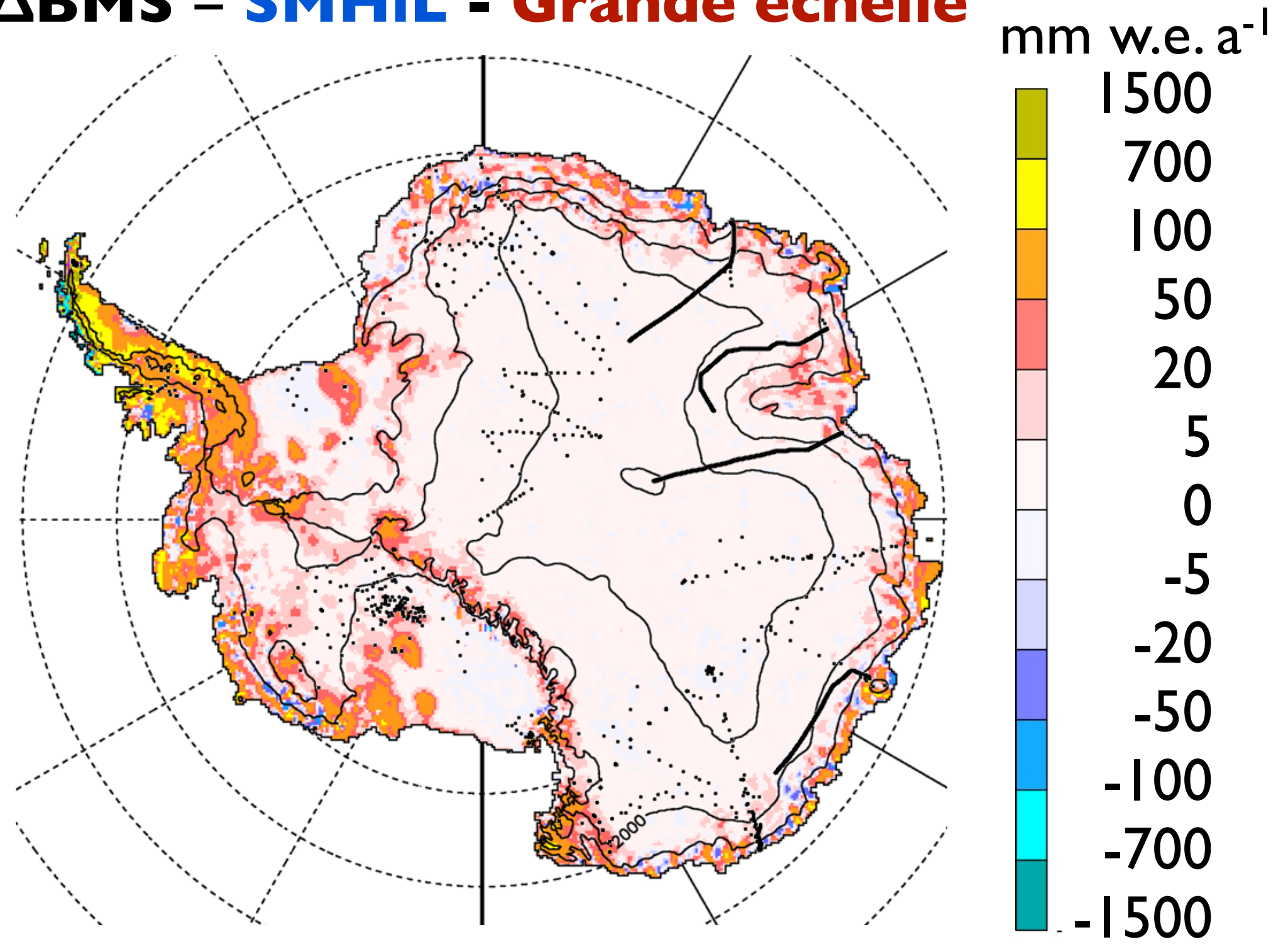


1.1

Comparaison à des observations de qualité contrôlée

BMS LMDZ4 1981-2000

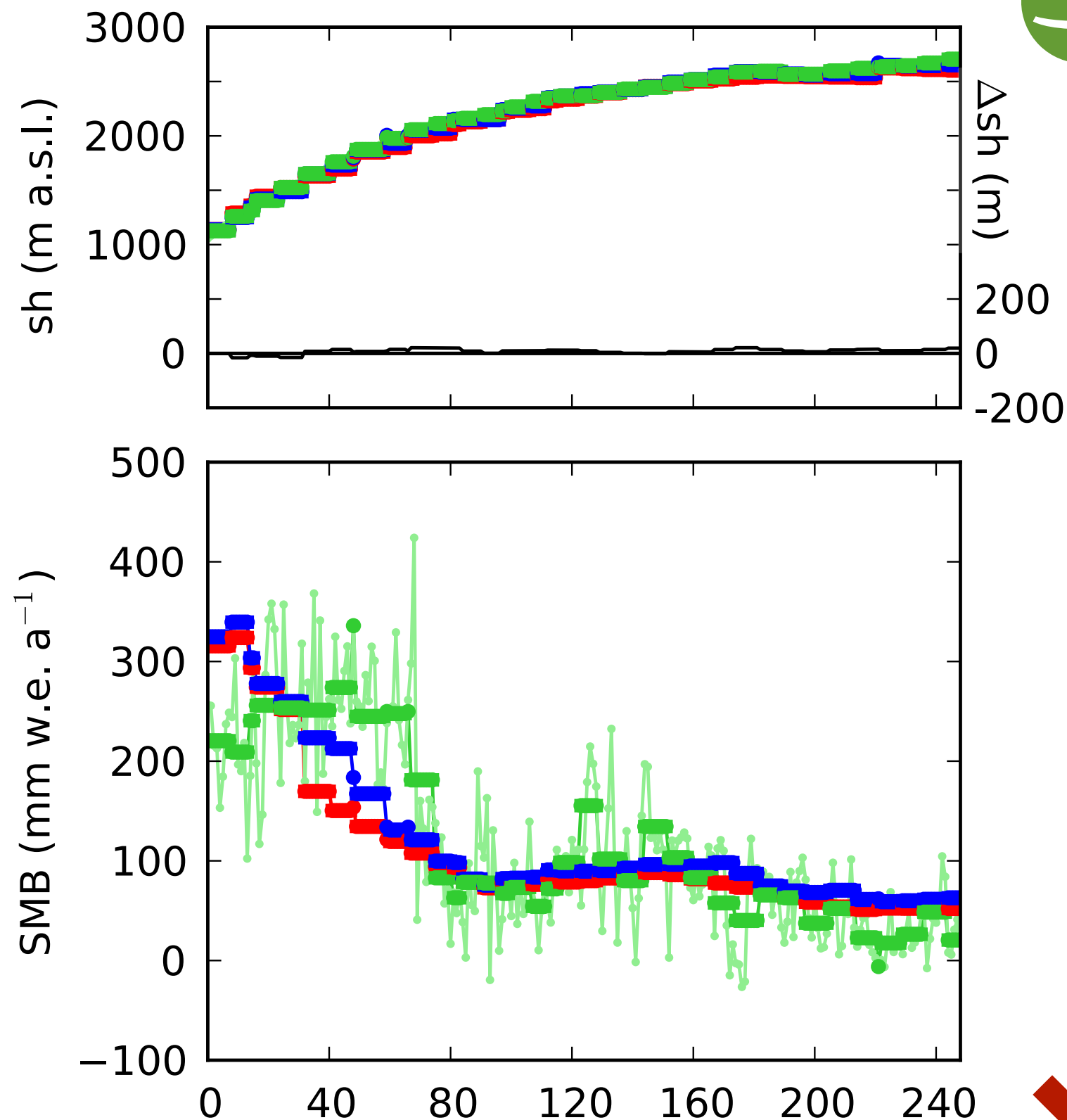
$\Delta BMS = SMHiL - \text{Grande échelle}$



1.1

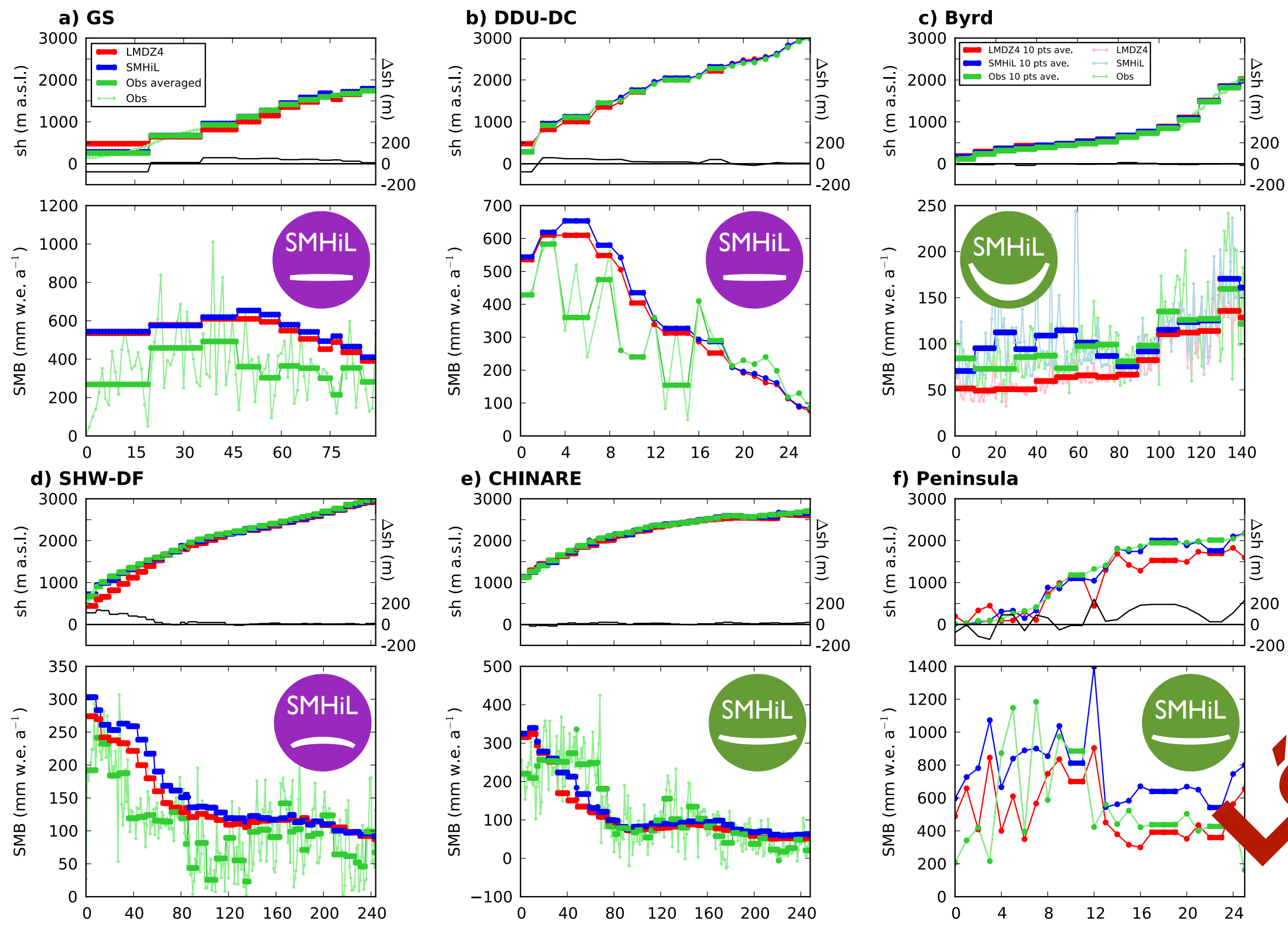
Comparaison à des observations de qualité contrôlée

e) CHINARE

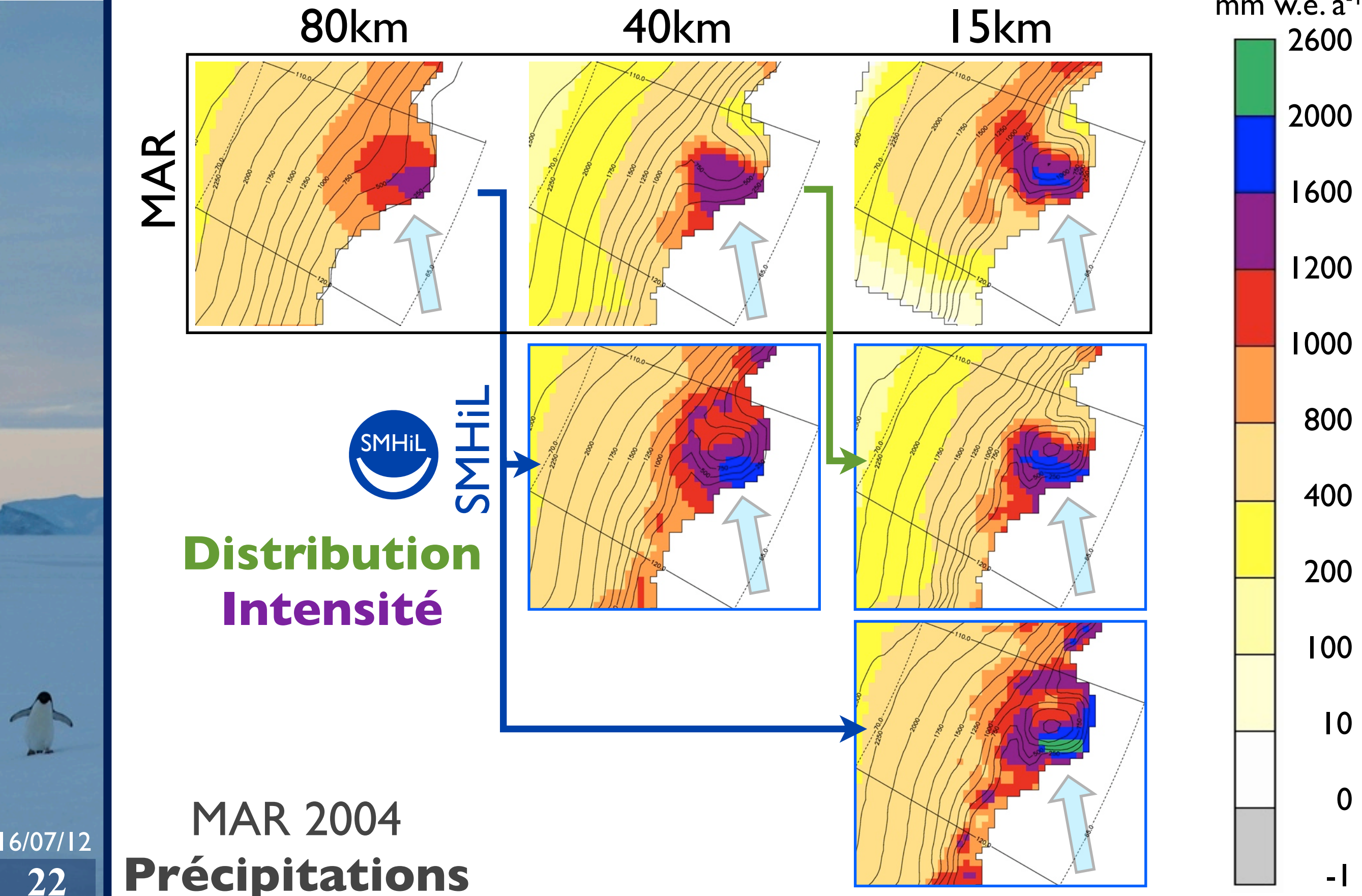


Légende

1.1 Comparaison à des observations de qualité contrôlée



3.2 Apport de la régionalisation à l'évaluation du BMS actuel



1.3 Régionalisation du bilan de masse de surface Antarctique

1

Modèle de climat

**Régionalisation****BMS modélisé
à haute résolution
mer → calotte**

Présent

**BMS observé**Présent
FuturContribution Antarctique au
niveau des mersPrésente
Future
←Ecoulement
calotte → mer

Modèle

2

Actuel

3

Futur

4

Concl.

5



1.3 Régionalisation du bilan de masse de surface Antarctique

1

Modèle

2

Actuel

3

Futur

4

Concl.

5



Projections futures :

Air : Température ↑ ⇒ Humidité ↑



Précipitations de neige ↑

Occurrences de pluie/fonte, sublimation ↑

Surtout en zone côtière

1.3 Régionalisation du bilan de masse de surface Antarctique

1

Modèle

2

Actuel

3

Futur

4

Concl.

5



Projections futures :

Air : Température ↑ ⇒ Humidité ↑

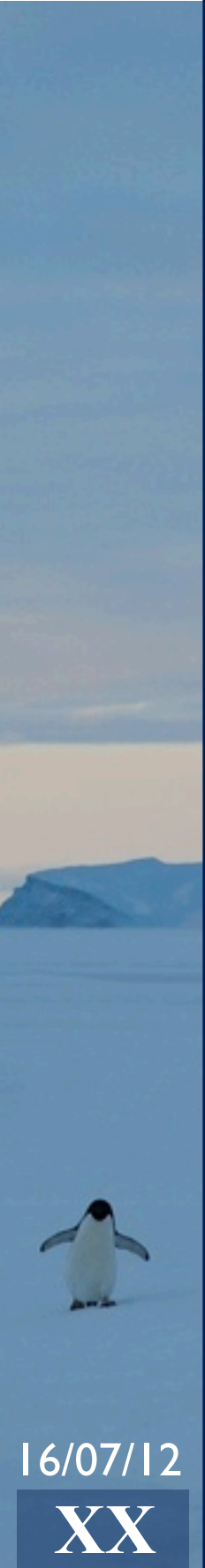


Précipitations de neige ↑

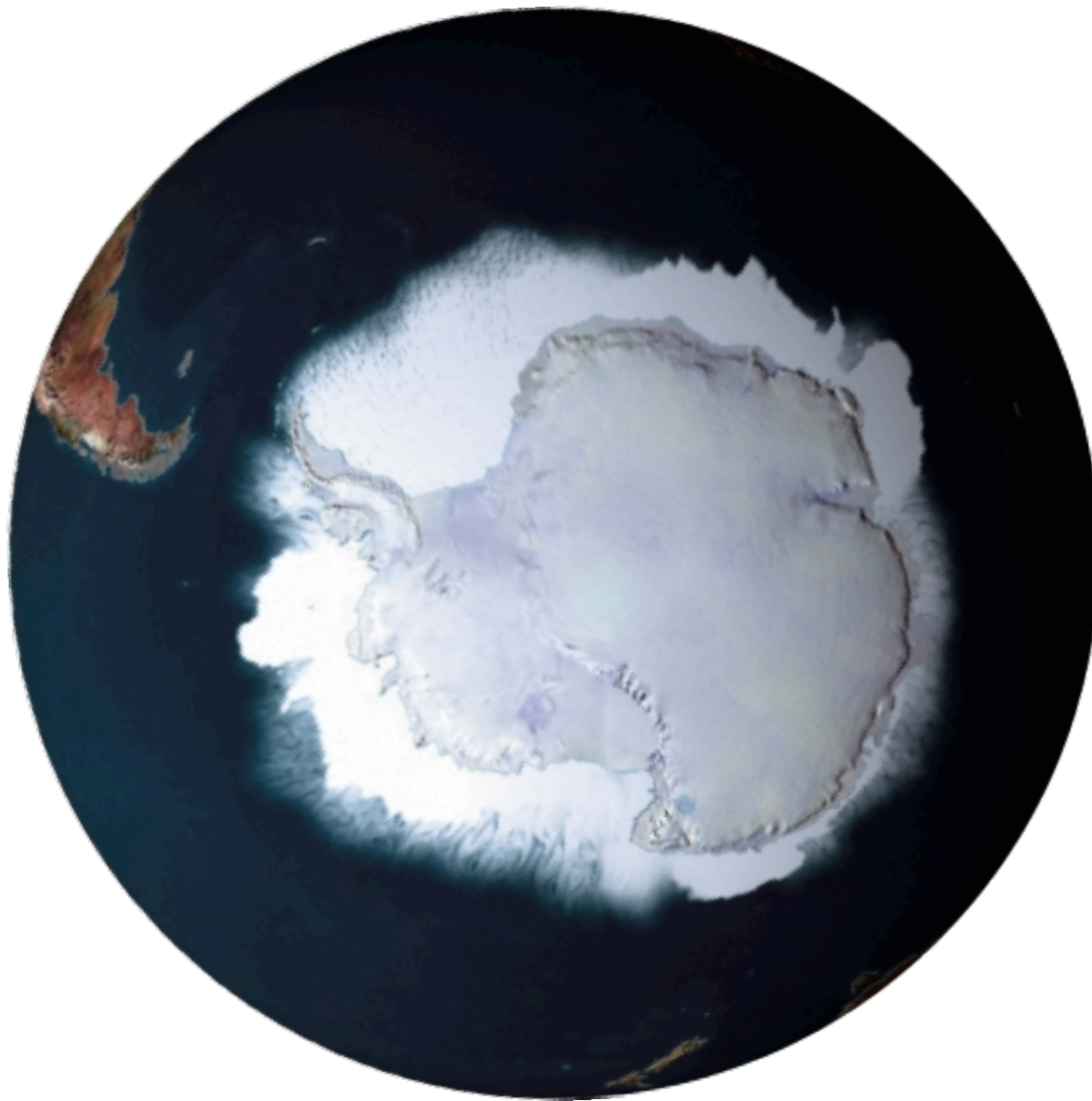
Occurrences de pluie/fonte, sublimation ↑

Surtout en zone côtière

1.1 L'Antarctique : un continent englacé



1.1 L'Antarctique : un continent englacé

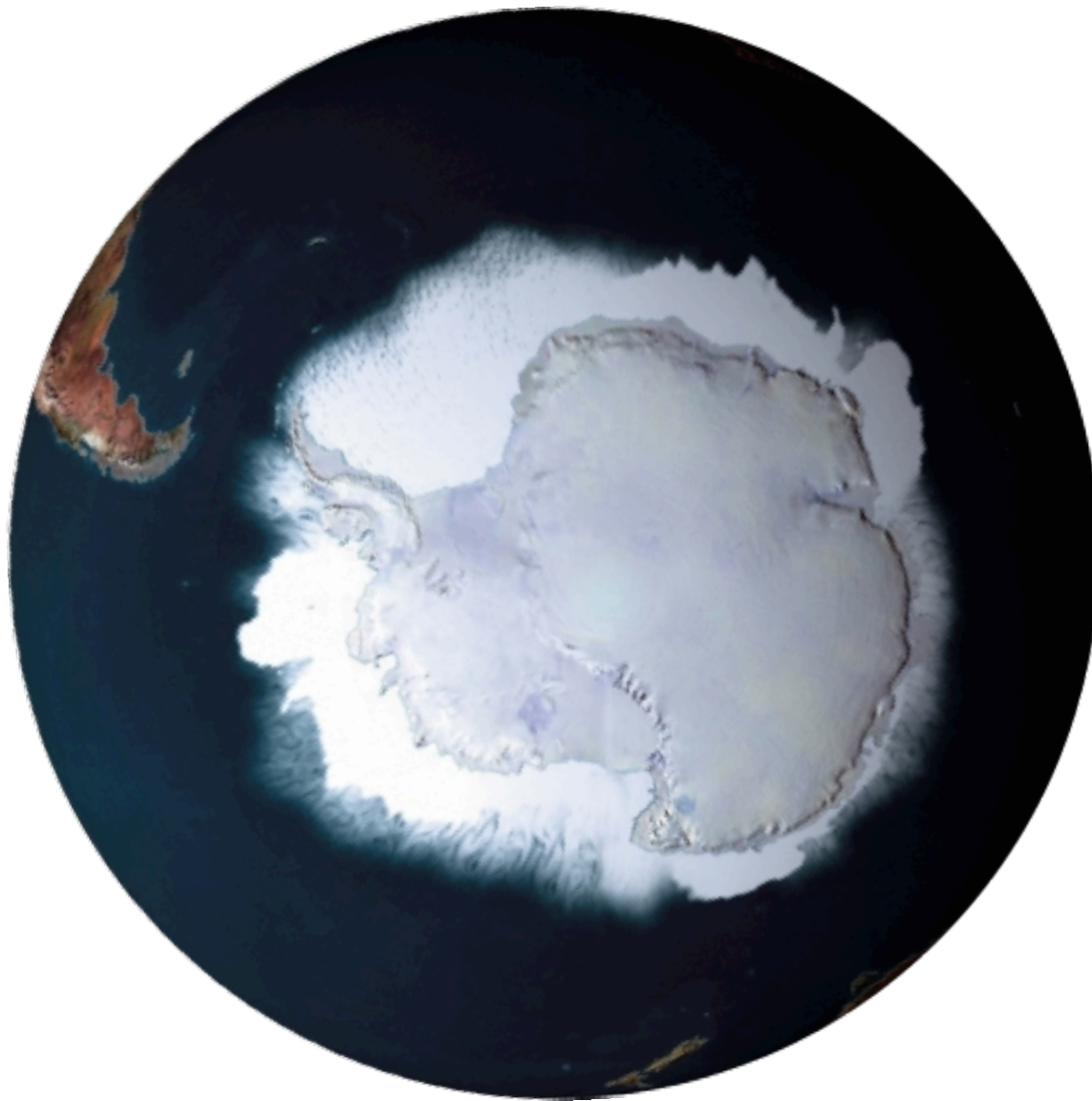


12,5 Millions de km²

(Russie: 17, USA : 7.9, UE : 4.4)



1.1 L'Antarctique : un continent englacé

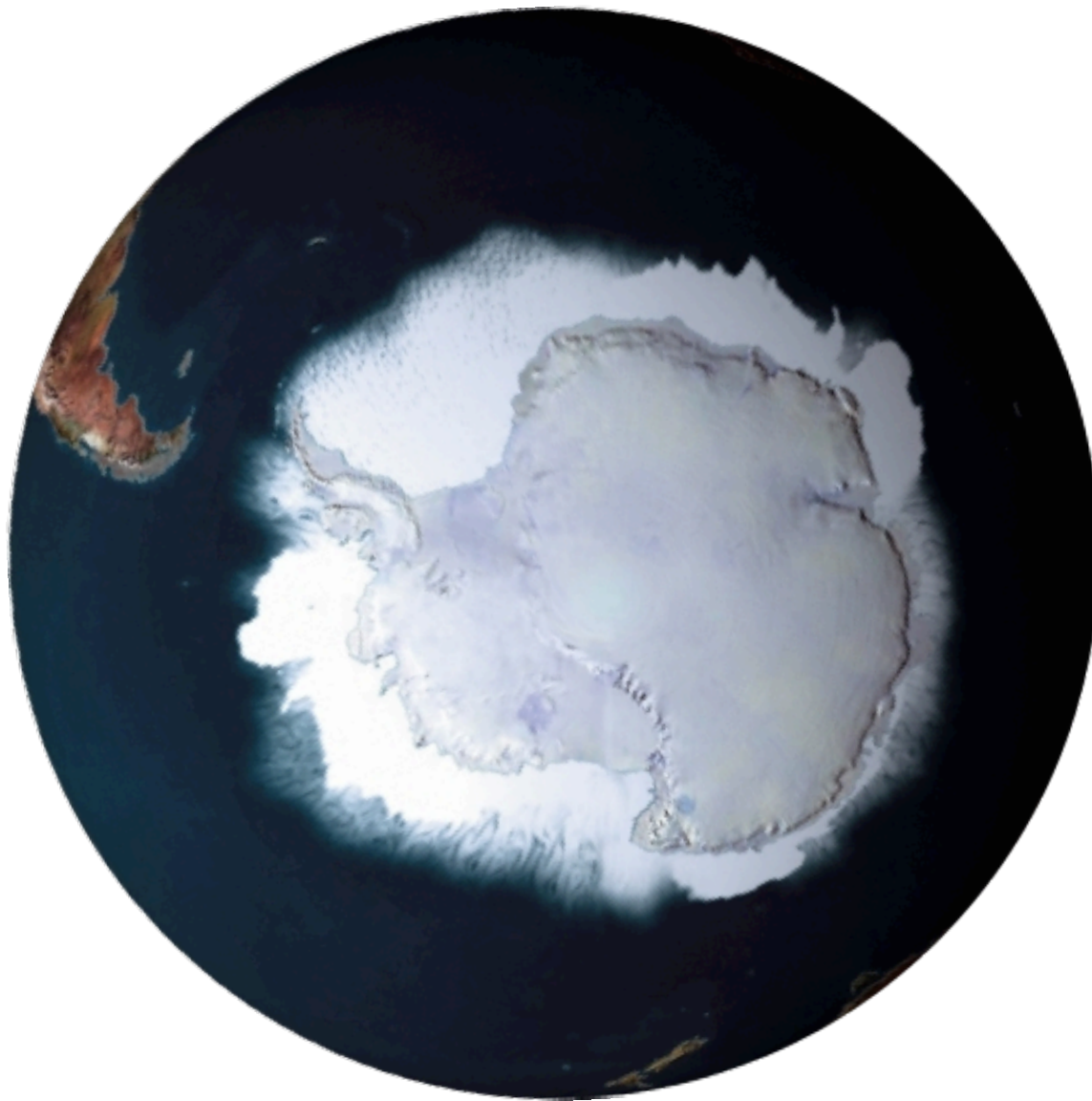


2,5 Millions de km²

(Russie: 17, USA : 7.9, UE : 4.4)



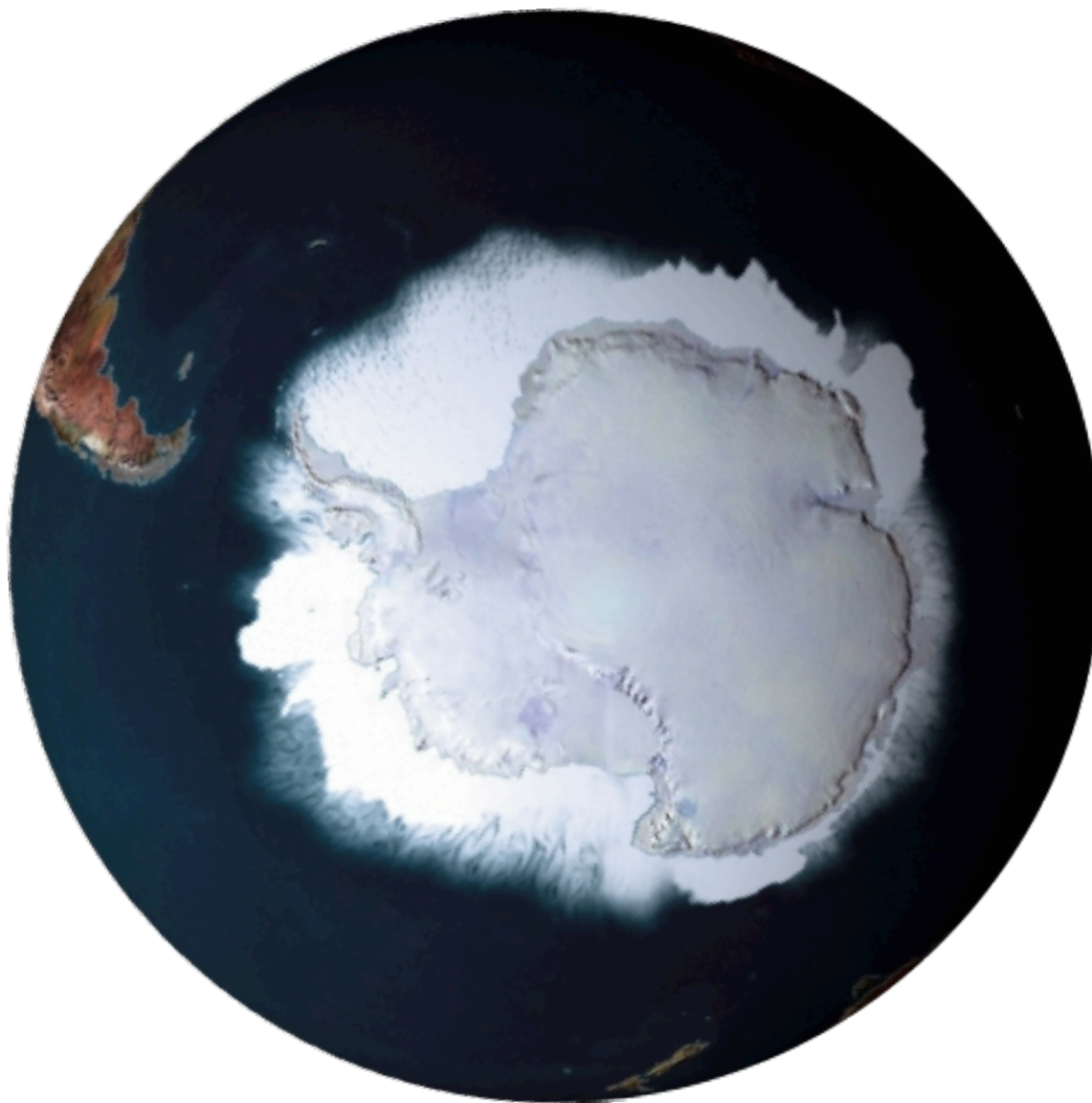
1.1 L'Antarctique : un continent englacé



3 à 4 Millions de km²
(Russie: 17, USA : 7.9, UE : 4.4)



1.1 L'Antarctique : un continent englacé



17 à 20 Millions de km²

(Russie: 17, USA : 7.9, UE : 4.4)



1.1

Géographie de la calotte polaire Antarctique

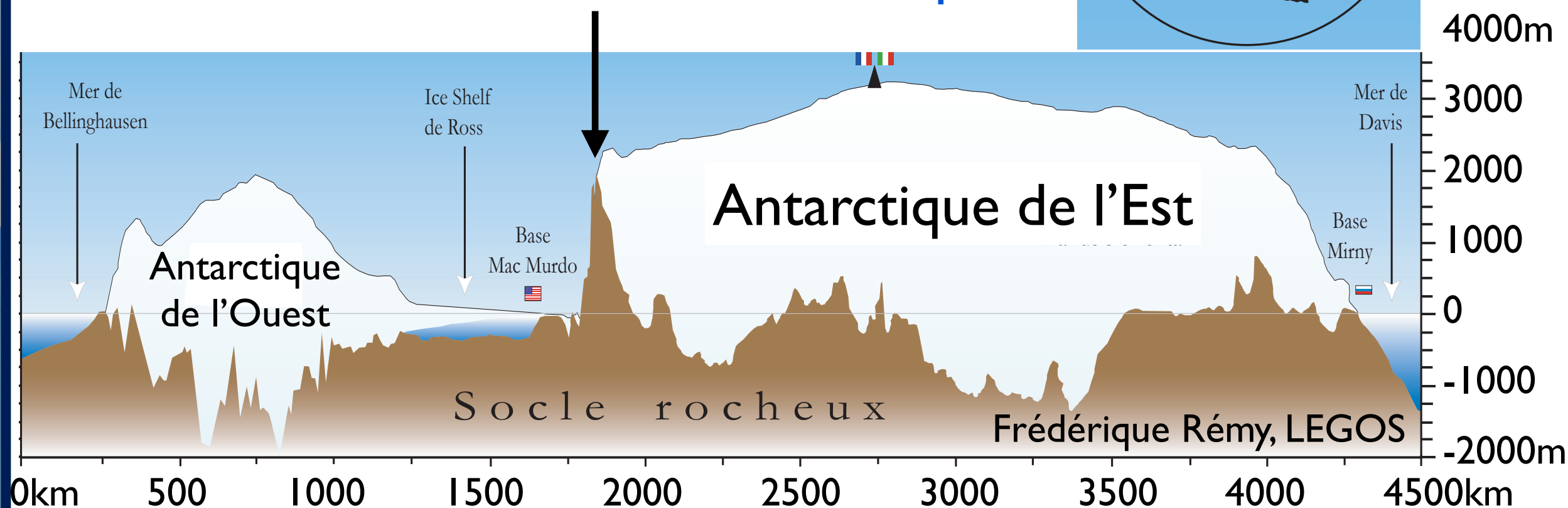
Epaisseur maximale de glace : 4800 m

Point culminant de glace : 4100 m

Point culminant en rocher : 4897 m



Chaîne transantarctique



1.1

Géographie de la calotte polaire Antarctique

1

Modèle

2

Actuel

3

Futur

4

Concl.

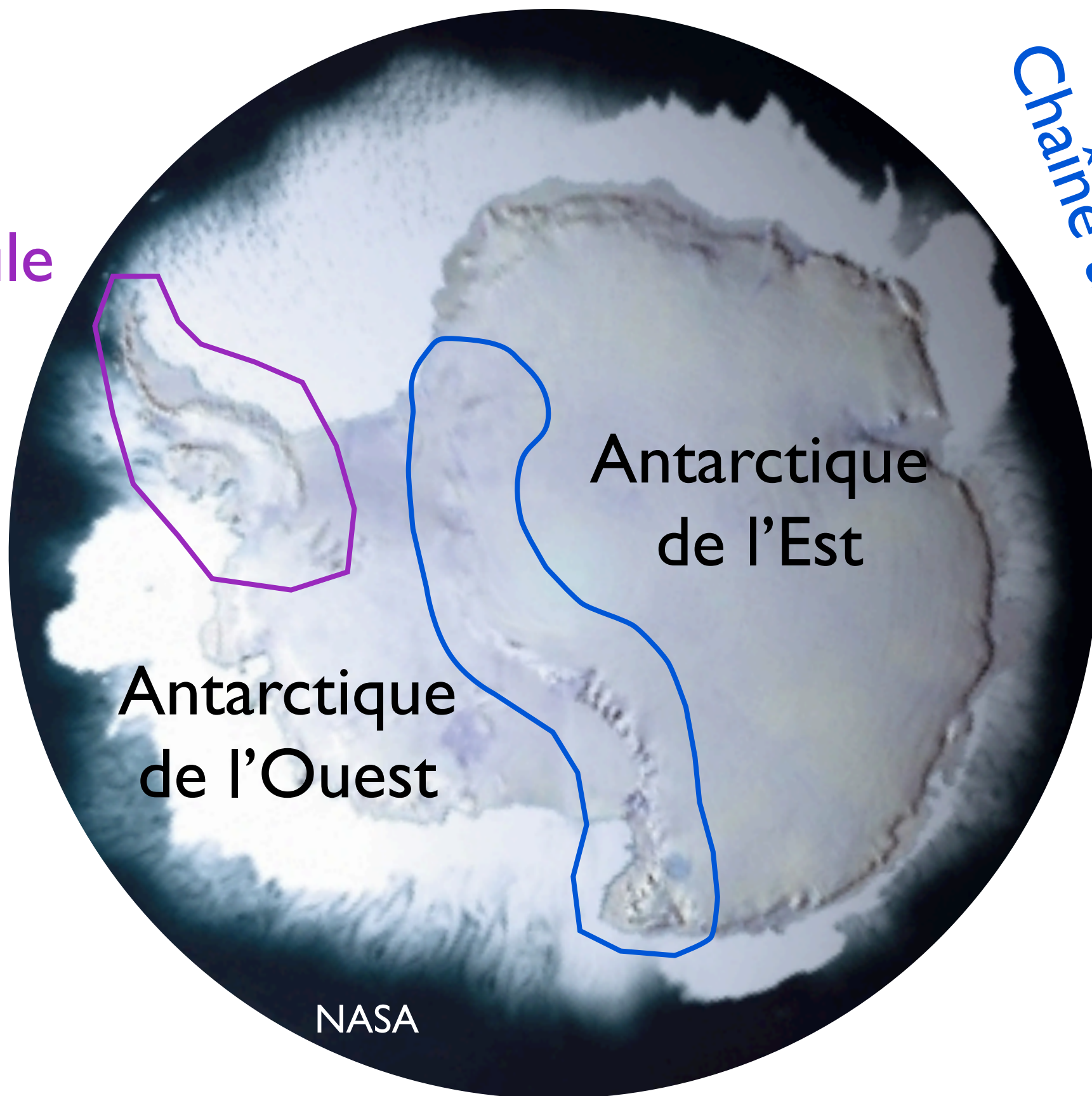
5



16/07/12

02

Péninsule

Antarctique
de l'EstAntarctique
de l'Ouest

NASA

Chaîne transantarctique

1.2

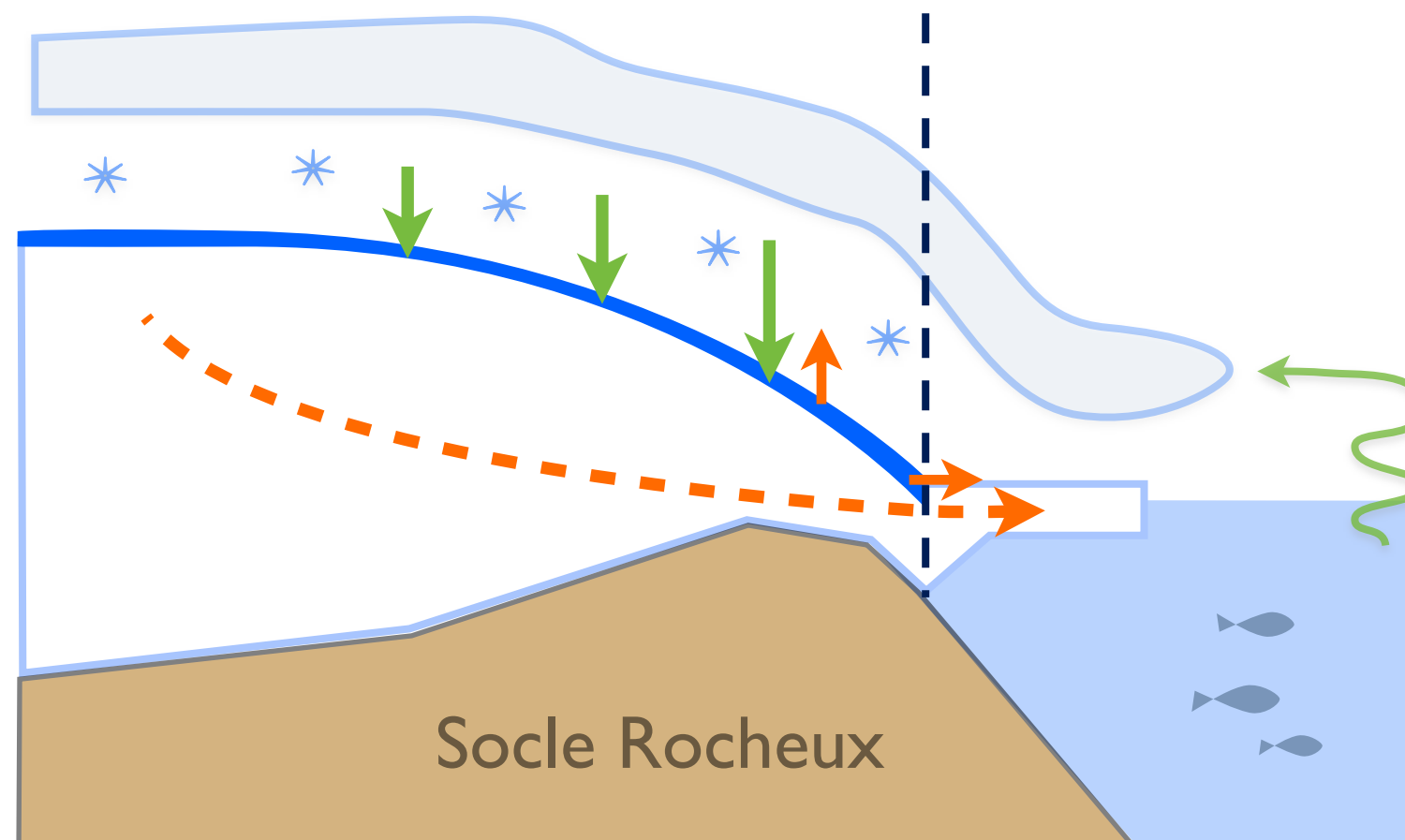
Bilan de masse de la calotte Antarctique et niveau des mers

Bilan de masse de la calotte

= bilan des flux d'eau **entrant** et **sortant** sur la calotte **posée**

= **Contribution au niveau des mers**

Bilan de Masse de Surface (Accu. nette) : Flux **entrant** et **sortant**
Ecoulement glaciaire (à travers la ligne d'échouage) : Flux **sortant**



Modèle

2

Actuel

3

Futur

4

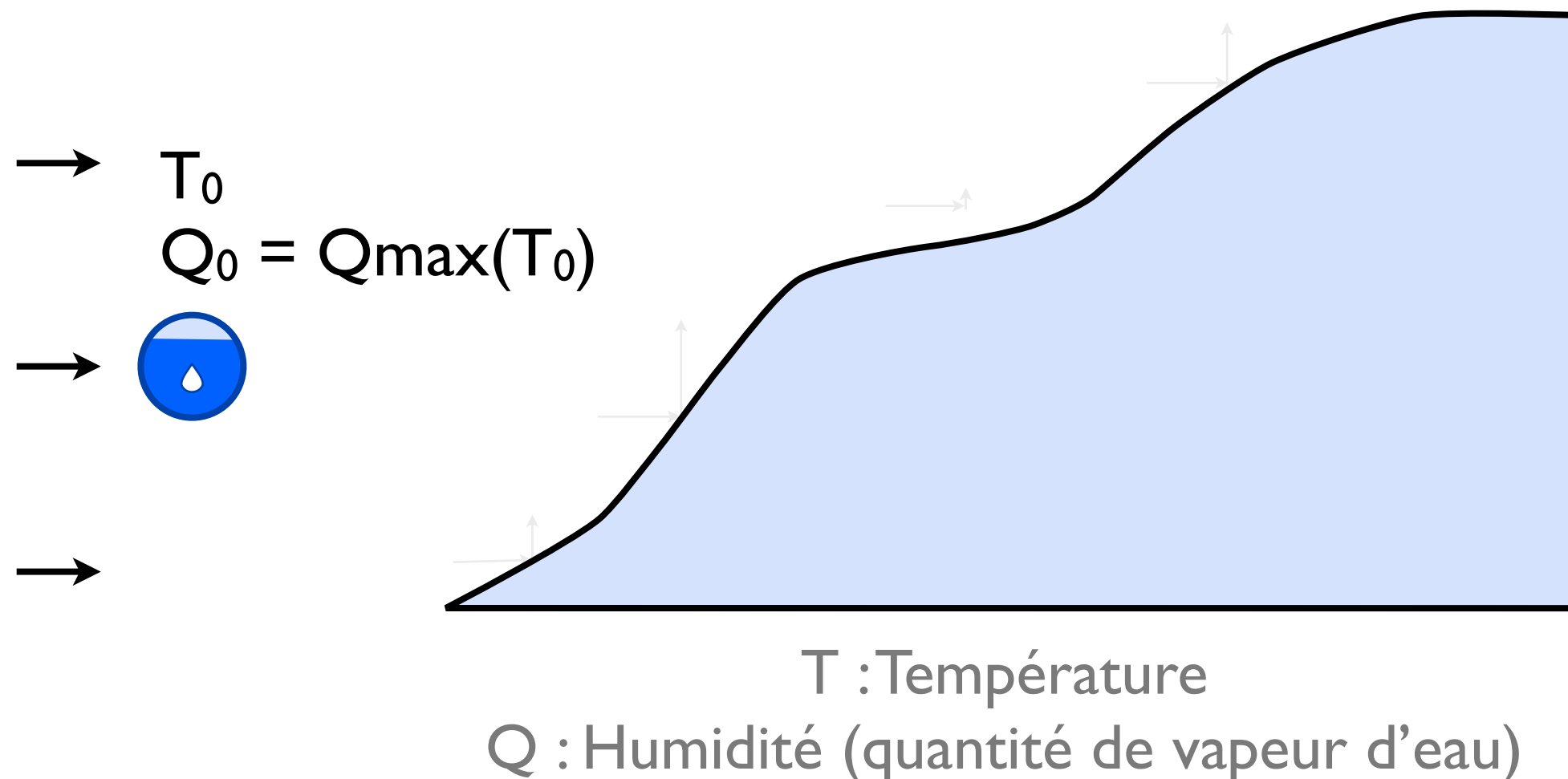
Concl.

5



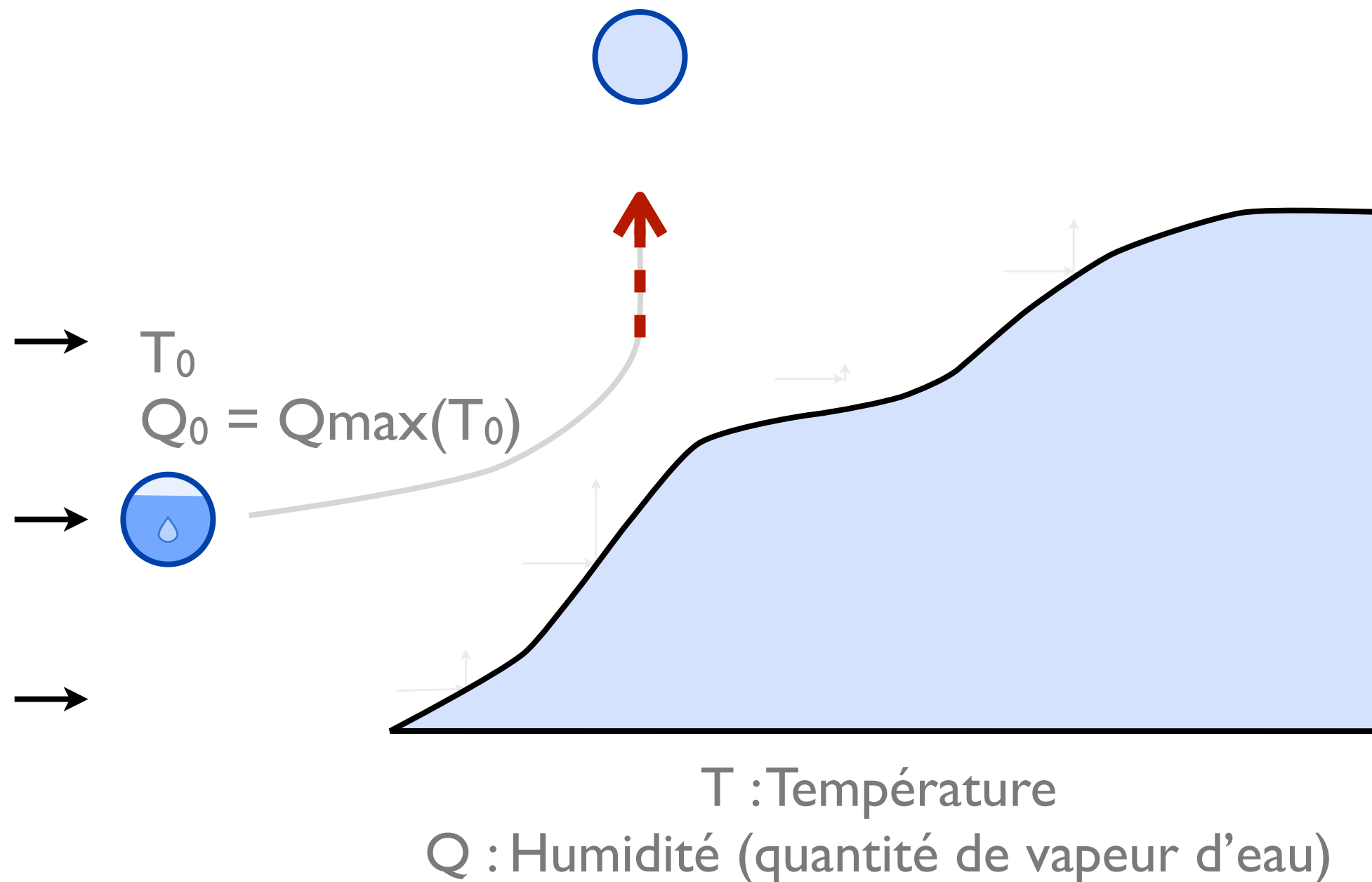
2.2 Régionalisation des précipitations

Elévation de masses d'air à saturation au dessus d'un relief



2.2 Régionalisation des précipitations

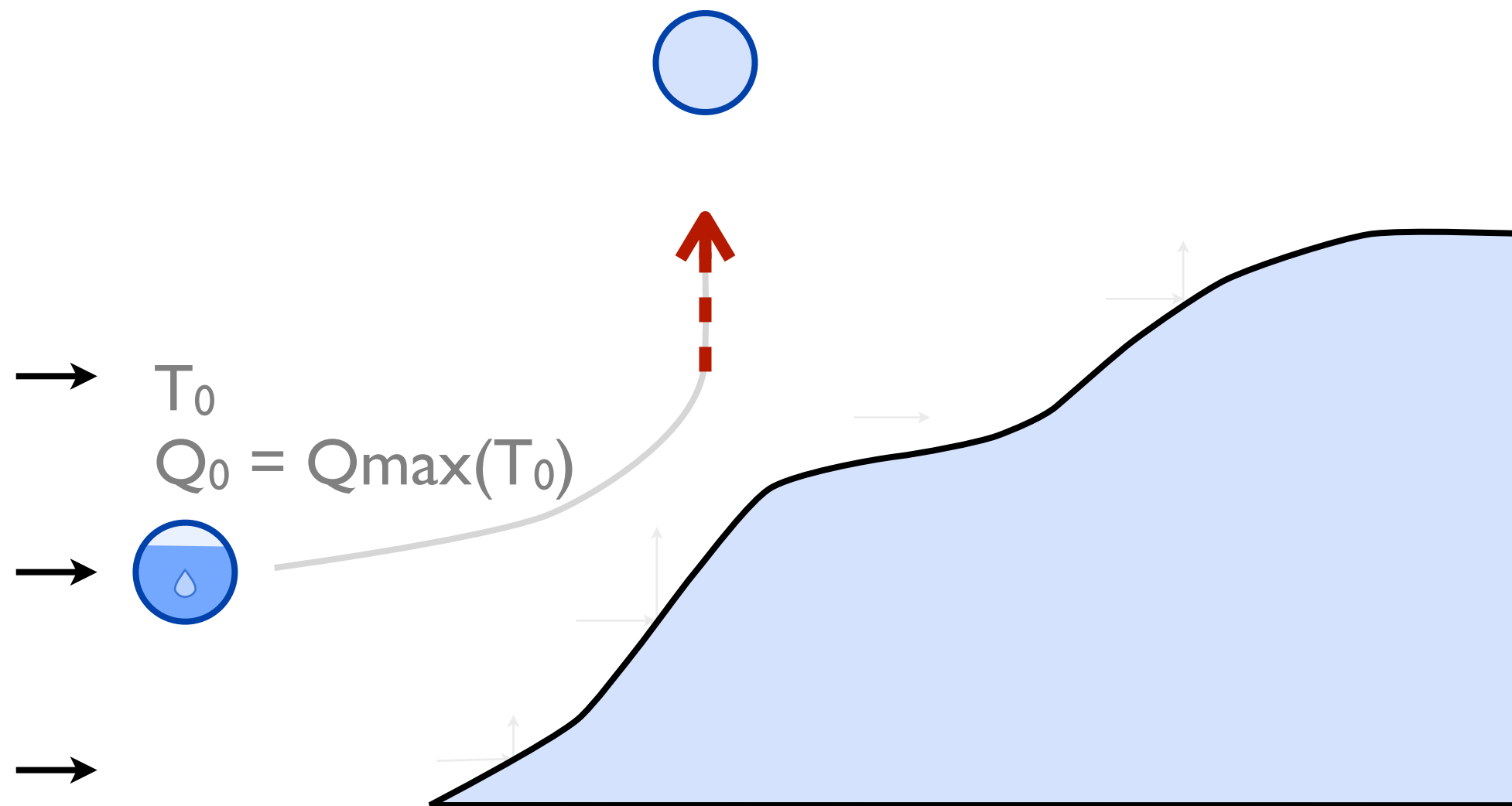
Elévation de masses d'air à saturation au dessus d'un relief



2.2 Régionalisation des précipitations

Elévation de masses d'air à saturation au dessus d'un relief

$T_1 < T_0$ (Refroidissement adiabatique)



T : Température

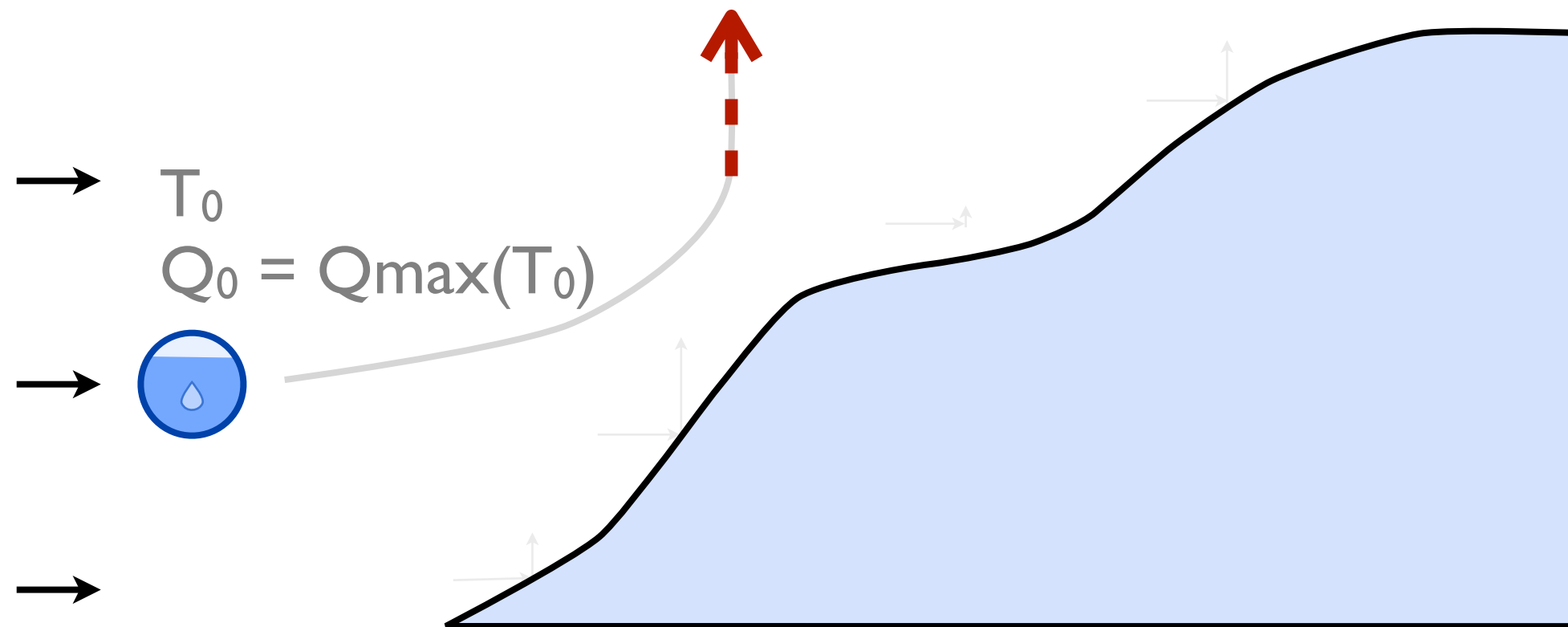
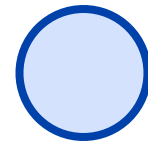
Q : Humidité (quantité de vapeur d'eau)

2.2 Régionalisation des précipitations

Elévation de masses d'air à saturation au dessus d'un relief

$T_1 < T_0$ (Refroidissement adiabatique)

$Q_1 = Q_{\max}(T_1) < Q_0$

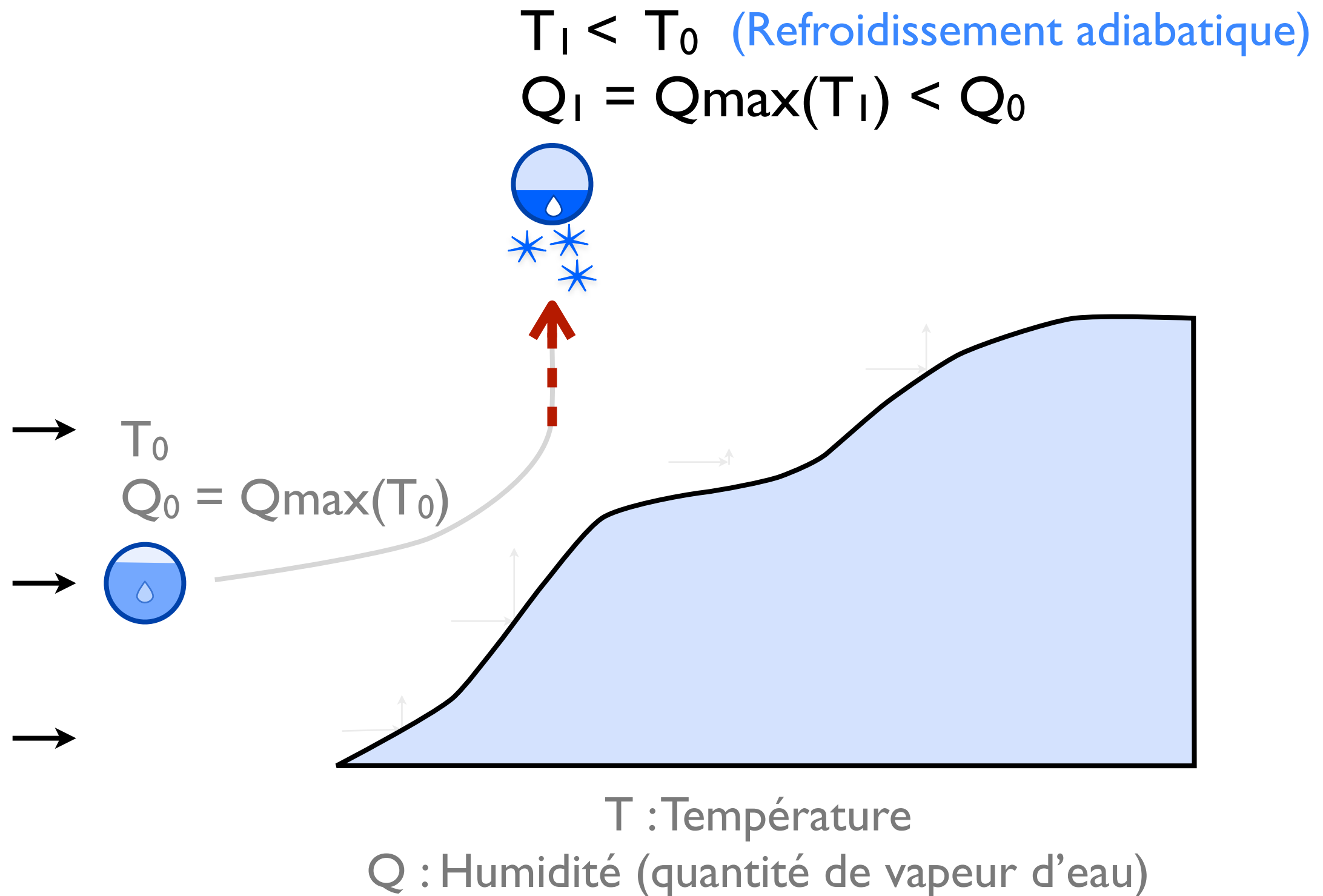


T : Température

Q : Humidité (quantité de vapeur d'eau)

2.2 Régionalisation des précipitations

Elévation de masses d'air à saturation au dessus d'un relief



2.2 Régionalisation des précipitations

Elévation de masses d'air à saturation au dessus d'un relief

$$T_1 < T_0 \text{ (Refroidissement adiabatique)}$$

$$Q_1 = Q_{\max}(T_1) < Q_0$$

